

PÅLKOMMISSIONEN

Teknisk PM 4:2015

Korrosion av stålkonstruktioner med lång förväntad livslängd - nuläges- sammanställning

Utförd av

Bertil Sandberg, Swerea KIMAB

FÖRORD

Av svenskt stål byggdes Eiffeltornet och det finns många stålkonstruktioner som är vackra, slanka och lättbyggda. För vissa miljöer behöver korrosion beaktas och i andra miljöer är korrosion ett mindre problem. Eiffeltornet målas om av 25 målare i 15 månader vart 5:e år. I Los Angeles finns det gott om gamla fina bilar som aldrig rostar då klimatet är gynnsamt. Tyvärr rostar bilar och andra stålkonstruktioner i Sverige, vilket måste beaktas under livslängden genom rostmån eller skydd av konstruktionen.

För Trafikverket är korrosion av stålkonstruktioner en viktig fråga eftersom klimatet medger korrosion och rätt dimensionering ger en låg samhällskostnad. Bland Trafikverkets stålkonstruktioner kan nämnas: armering i betong, räcken och detaljer på broar, bergbult i tunnlar, inredningar i tunnlar, stålsponter, räls, kontaktledningar, stolpar mm.

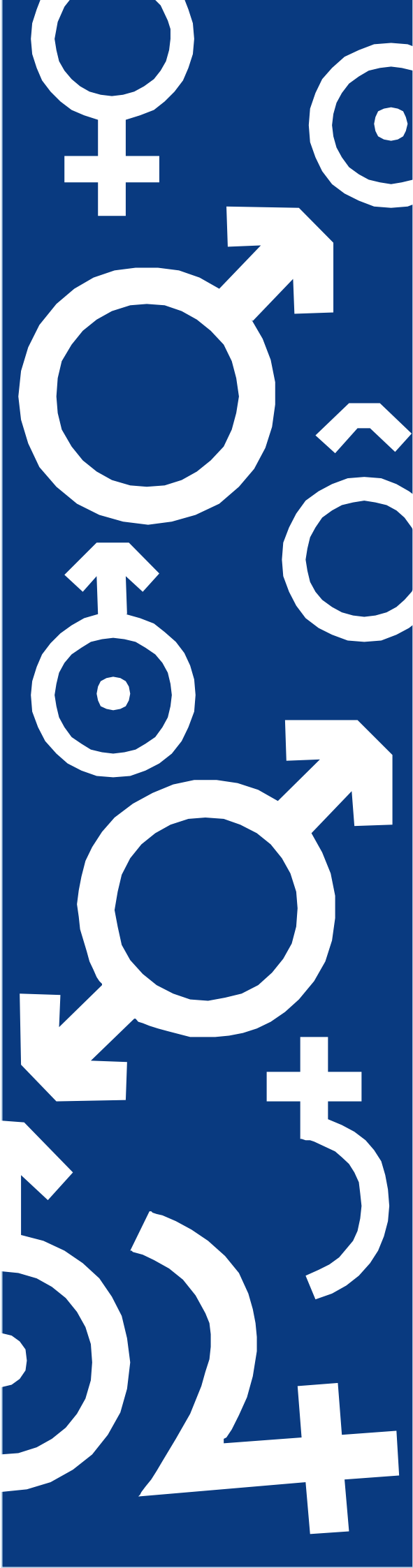
Konstruktionerna finns i olika miljöer med olika aggressivitet och små skillnader i miljö kan ge upphov till stora skillnader i korrosion.

I föreliggande rapport redogörs för olika situationer där korrosion uppkommer och hur kombinatoriska effekter kan ge upphov till avsevärt högre korrosion. I rapporten redovisas hur korrosion ska beaktas enligt olika standarder och hur ett förenklat standardiserat förfarande kan resultera i en missbedömning av verklig korrosionshastighet på upp till 7 gånger.

Rapporten ger även vägledning för bedömning av korrosionsrisk för olika situationer som med fördel kan användas som en handbok. Rapporten utgör ett bra underlag för en framtida nationell bilaga till Eurokod.

Rapporten är en nulägesbeskrivning inom området med fokus på korrosion av spont som finansierat av Trafikverket.

Solna i januari 2016
Thomas Dalmalm



Korrosion av stålkonstruktioner med lång förväntad livslängd - nulägesammanställning

Handläggare: Bertil Sandberg
Sektion: 48
Telefon: 08-4404889
E-post: bertil.sandberg@swerea.se
Datum: 2016-01-14

Er referens Håkan Ahlström
Trafikverket

Swerea KIMAB ref.nr: 11659:2
Ert referensnummer: TRV 2014/28770

Granskad av: _____
(Lena Sjögren)

Korrosion av stålkonstruktioner med lång förväntad livslängd - nulägessammanställning

Handläggare Bertil Sandberg

Datum 2016-01-14

Vårt referensnr. 11659:2.ver1

Sammanfattning

Dimensionering av pålar och spont i vatten och jord, med hänsyn taget till rostmån, kan idag ske på basis av Eurokod 3 (SS-EN 1993-5:2007). Tidigare har man i Sverige tillämpat de rekommendationer som ges i Pålkommisionens rapport 98, kapitel 7. Kraven i de båda dokumenten skiljer sig i många fall kraftigt åt. I de flesta fall anges lägre rostmån i Eurokoden. Ett behov föreligger således att fastställa orsaken till dessa skillnader d.v.s. är kraven i Pålkommisionens rapport för stränga eller de i Eurokoden för milda alternativt skiljer sig korrosionsförhållandena i Sverige från de på kontinenten. Ett behov av en nationell bilaga till Eurokoden kan då föreligga.

Som ett första steg i arbetet att fastställa vilka krav som bör gälla genomfördes denna nuläges-sammanställning. Arbetet utfördes av Swerea KIMAB på uppdrag av Trafikverket och ingår i ett större uppdrag vars mål är att fastställa krav och föreslå metoder för verifiering av kraven. Sammanställningen ska även omfatta vilka förundersökningar som görs i ett projekterings-skede och hur korrosionsrisken bedöms.

Utredningen visar att för stålkonstruktioner i jord är inte jordarten den bestämmande faktorn för korrosionsrisken. Under grundvattenytan är korrosionsrisken försumbar i alla typer av jordar om inte läckströmmar finns. Den allvarligaste korrosionen uppstår strax under grundvattenytan. Avgörande för korrosionshastigheten i denna zon är vilka förhållanden som råder i jorden ovanför grundvattenytan. Viktiga faktorer är jordens luftning, dess vattenhalt och dess resistivitet. En minsta rostmån på 1 mm för 100 år krävs alltid. Vid behov bör ytterligare korrosionsskyddande åtgärder sättas in på de delar av konstruktionen som befinner sig ovanför grundvattenytan. Detta för att indirekt minska korrosionen strax under grundvattenytan. I rapporten ges förslag på nya krav.

Nödvändiga förundersökningar i jord föreslås vara:

- Fastställande av jordtyp. Kan i vissa fall ersättas med resistivitetsmätning.
- Uppmätning av grundvattenytans läge om korrosionsskyddande åtgärder planeras för konstruktionsdelar ovanför grundvattenytan.
- Uppmätning av elektriska gradienter om misstanke om läckströmspåverkan föreligger.

I rapporten föreslås en metodik för hur korrosionsrisken i jord ska bedömmas och vilka korrosionsskyddande åtgärder som finns tillgängliga. Det fortsatta arbetet föreslås inriktas mot att fastställa vilka resistivitetsvärden som svarar mot vilka rostmåner i den förenklade bedömningen. Vidare måste frågan om invändig rostmån i rörpålar studeras mer ingående. Metoder bör tas fram och gränsvärden stipuleras för kontroll av beläggningsskador och verifiering av risk för läckströmskorrosion.

För vertikala konstruktioner som exponeras för luft, vatten och bottensediment är korrosionen i atmosfär och i bottensediment inte bestämmande för konstruktionens livslängd. Kraftigast korrosion uppstår i skvalpzonen. I princip är det omöjligt att bygga en konstruktion med rimlig rostmån som inte perforeras av korrosion i vattenlinjen före 100 år. Skvalpzonen måste förses med ett förstärkt korrosionsskydd. Om åtgärder vidtas mot korrosionen i skvalpzonen så kommer konstruktionens livslängd att bestämmas av korrosionen i undervattenszonen. Här kan rostmån tillämpas. En kraftigt förenklad tabell för rostmån (100 år) föreslås, nämligen 3 mm i sötvatten, 3-7,5 mm i skiktat vatten och 7,5 mm i saltvatten/bräckt vatten. I korrosionsriskbedömningen bör också ingå om risk föreligger för kraftiga propellerrörelser eller om konstruktioner kommer att stå i strömmande vatten.

Förslag på korrosionsskyddande åtgärder för konstruktioner i vatten ges i rapporten. Vidare redovisas olika metoder för kontroll av en konstruktions korrosionsstatus och vilka analyser som krävs för att bedöma risken för mikrobiell korrosion. I det fortsatta arbetet bör ingå fortsatta studier av risken för mikrobiell korrosion på konstruktioner i vatten och hur mycket ett förhöjt flöde påverkar korrosionshastigheten i sött vatten. Metodik för och tillförlitlighet hos metoder att verifiera en konstruktions korrosionsstatus tillhör andra områden som bör ingå i det fortsatta arbetet.

Innehållsförteckning

1.	Bakgrund	9
2.	Syfte	9
3.	Korrosion i jord och vatten – en introduktion	9
3.1	Allmänt	9
3.1.1	Allmän korrosion	11
3.1.2	Gropfrätning.....	11
3.1.3	Mikrobiell korrosion.....	11
3.1.4	Galvanisk korrosion	13
3.1.5	Läckströmskorrosion	14
3.2	Korrosion i jord	14
3.2.1	Olika jordars korrosivitet.....	15
3.2.2	Mikrobiell korrosion.....	17
3.2.3	Galvanisk korrosion	18
3.2.4	Läckströmskorrosion	18
3.3	Korrosion i vatten.....	20
3.3.1	Olika vattens korrosivitet.....	20
3.3.2	Mikrobiell korrosion.....	29
3.3.3	Galvanisk korrosion	30
3.3.4	Läckströmskorrosion	31
4.	Erfarenheter av korrosion på stålplåtar och spont i jord	31
4.1	Svenska jordars korrosivitet.....	31
4.2	Korrosionens utveckling med tiden.....	32
4.3	Inverkan av jordart och placering.....	32
4.4	Inverkan av jordresistivitet	41
4.5	Inverkan av legeringstillsatser till stål.....	42
4.6	Inverkan av konstruktiv utformning.....	42
5.	Erfarenheter av korrosion på stålplåtar och spont i vatten.....	43
5.1	Sötvatten	44
5.2	Havsvatten och bräckt vatten	47
5.3	Skiktat vatten.....	53
5.4	Inverkan av legeringstillsatser till stål.....	54
5.5	Inverkan av konstruktiv utformning.....	54
5.6	Inverkan av driftförhållanden	55
6.	Åtgärder mot korrosion.....	56
6.1	Rostmån	56

6.2	Organiska beläggningar	56
6.3	Oorganiska beläggningar	57
6.4	Ingjutning i injekteringsbruk/nedgjuten krönbalk.....	58
6.5	Påsvetsning	60
6.6	Katodiskt skydd.....	60
6.7	Utbyte/förändring av omgivande jord/bottensediment.....	62
6.8	Kombination av olika skyddsåtgärder	62
7.	Krav i normer och standarder	63
7.1	Dimensionering enligt Eurokod SS-EN 1993-5.....	63
7.2	Dimensionering enligt Pålkommisionens rapport 98.....	65
7.3	Dimensionering enligt VTT	66
7.4	TRVK Bro 11.....	68
8.	Kritisk granskning av uppställda krav på rostmån	70
8.1	Jord	70
8.1.1	Allmänt	71
8.1.2	Ostörd naturlig jord (sand, grusiga moräner).....	71
8.1.3	Ostörd naturlig jord (lera, silt, leriga/siltiga moräner)	72
8.1.4	Packad icke aggressiv fyllning (okontrollerad fyllning av naturlig jord).....	72
8.1.5	Icke packad icke aggressiv fyllning (okontrollerad fyllning av naturlig jord) ...	72
8.1.6	Förorenad naturlig jord och jord i industriområde	73
8.1.7	Aggressiv naturlig jord (kärr, gytta, torv etc)	73
8.1.8	Packad aggressiv fyllning (askor, slagg etc).....	73
8.1.9	Icke packad aggressiv fyllning (askor, slagg etc)	74
8.1.10	Jordar som gömsätts av havsvatten	74
8.1.11	Mark med läckströmmar.....	74
8.1.12	Påle/spont som går genom markytan.....	75
8.1.13	Förslag på rostmåner	75
8.2	Invändigt i rörpåle	76
8.3	Vatten.....	77
8.3.1	Allmänt	77
8.3.2	Sötvatten	78
8.3.3	Bräckt och salt vatten	79
8.3.4	Skiktat vatten	79
8.3.5	Förslag på rostmåner	80
9.	Förundersökningar	80
9.1	Jordinstallationer	80

9.1.1	Fastställande av jordtyp	81
9.1.2	Uppmätning av grundvattenytan	81
9.1.3	Uppmätning av elektriska gradienter	82
9.2	Vatteninstallationer	83
10.	Bedömning av korrosionsrisk och val av åtgärd	84
10.1	Konstruktioner i jord.....	84
10.1.1	Utvändig korrosionsrisk	84
10.1.2	Åtgärder mot utvändig korrosion	84
10.1.3	Invändig korrosionsrisk	85
10.1.4	Åtgärder mot invändig korrosionsrisk.....	85
10.2	Konstruktioner i vatten.....	86
10.2.1	Korrosionsrisk.....	86
10.2.2	Exempel på åtgärder	86
11.	Kontroll	87
11.1	Jordinstallationer.....	87
11.1.1	Kontroll av korrosion	87
11.1.2	Kontroll av skador på ytbeläggning	88
11.1.3	Kontroll av skyddsverkan vid katodiskt skydd.....	88
11.2	Vatteninstallationer.....	88
11.2.1	Kontroll av korrosion	88
11.2.2	Kontroll av risk för mikrobiell korrosion	91
11.2.3	Kontroll av skyddsverkan vid katodiskt skydd.....	92
12.	Referenser.....	94

1. Bakgrund

Dimensionering av pÅlar och spont i vatten och jord, med hÅnsyn taget till rostmÅn, kan idag ske pÅ basis av Eurokod 3 (SS-EN 1993-5:2007). Tidigare har man i Sverige tillÅmpat de rekommendationer som ges i PÅlkommissionens rapport 98, kapitel 7. Kraven i de bÅda dokumenten skiljer sig i mÅnga fall kraftigt Åt. I de flesta fall anges lÅgre rostmÅn i Eurokoden. Ett behov fÅreligger sÅledes att faststÅlla orsaken till dessa skillnader d.v.s. År kraven i PÅlkommissionens rapport fÅr strÅnga eller de i Eurokoden fÅr milda alternativt skiljer sig korrosionsfÅrhÅllandena i Sverige frÅn de pÅ kontinenten. Ett behov av en nationell bilaga till Eurokoden kan dÅ fÅreligga.

Som ett fÅrsta steg i arbetet att faststÅlla vilka krav som bÅr gÅlla genomfÅrs denna nulÅgessammanstÅllning. Arbetet utfÅrs av Swerea KIMAB pÅ uppdrag av Trafikverket och ingÅr i ett stÅrre uppdrag vars mÅl År att faststÅlla krav och fÅreslÅ metoder fÅr verifiering av kraven.

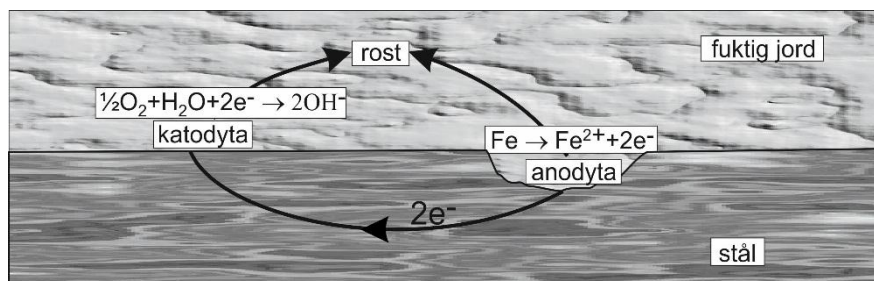
2. Syfte

Syftet med nulÅgessammanstÅllningen År att sammanstÅlla de utredningar och den forskning som har gjorts inom omrÅdet korrosion och korrosionsskydd av pÅlar och spont i jord och vatten. SammanstÅllningen ska Åven omfatta vilka fÅrundersÅkningar som gÅrs i ett projekteringsskede och hur korrosionsrisken bedÅms.

3. Korrosion i jord och vatten – en introduktion

3.1 AllmÅnt

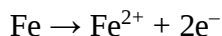
Korrosion pÅ stÅl i jord och vatten År av elektrokemisk natur. Detta innebÅr att medan det sker kemiska reaktioner pÅ stÅlytan flyter en elektrisk strÅm. FÅrloppet sker i korrosionsceller som bildas pÅ stÅlytan. Dessa bestÅr av en anodyta och en katodyta samt en elektrolyt, se figur 3.1.



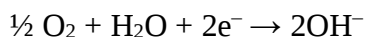
Figur 3-1. Korrosionscell.

Beroende på anod- och katodyternas antal och storlek varierar korrosionstypen och korrosionens omfattning. Vid "allmän korrosion" förekommer ett stort antal små anod- och katodytor på stålytan som dessutom skiftar plats. Vid "lokal korrosion" är antalet celler litet och anod- och katodyterna tydligt separerade. Om anodytan är liten jämfört med katodytan blir korrosionshastigheten hög.

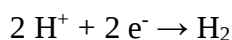
Under korrosionsförloppet sker samtidigt vid anod- och katodyterna två skilda elektrodreaktioner. Vid anodytan sker en oxidation av stålet, som upplöses.



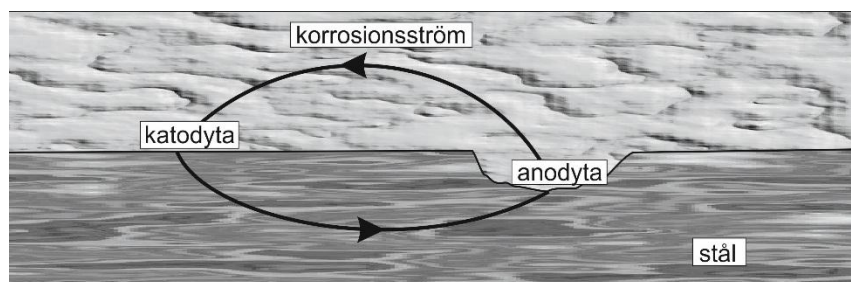
Elektronerna som frigörs vid oxidationen transporteras i stålet till det katodiska området där de förbrukas i en reduktion. I jord och vatten är denna reduktion vanligen reduktion av syre.



I jord eller vatten med pH-värde lägre än ca 4 kan även vätejoner bidra till katodreaktionen.



Elektronerna rör sig i metallen från anod till katod. Detta är det samma som en ström i motsatt riktning, se figur 3-2. En elektrisk krets måste vara sluten varför det också måste finnas en ström i jorden. Där transporteras den av joner i elektrolyten.



Figur 3-2. Korrosionsströmmen

Man skiljer på två huvudtyper av korrosionsceller:

- Korrosionsceller med särskiljbara anod- och katodytor t.ex. en aluminiumplåt med en skruv av mässing, där aluminium utgör anod och mässingen katod.
- Korrosionsceller utan särskiljbara anod- och katodytor. Hela metallytan tjänstgör som både anod och katod. Anod- och katodyterna är små och talrika samt byter ofta plats med varandra.

Med hänsyn till korrosionens orsaker och förlopp samt skadans utseende kan man särskilja ett flertal olika korrosionstyper. För spont och pålar i jord och vatten är följande typer aktuella:

- Allmän korrosion
- Gropfrätning
- Mikrobiell korrosion
- Galvanisk korrosion
- Läckströmskorrosion

3.1.1 Allmän korrosion

Utmärkande för allmän korrosion är att den sker med ungefär samma hastighet på hela den yta som är utsatt för det korrosiva mediet. Omfattningen kan anges genom massförlusten per ytenhet eller genom medelfrätningen, som är medelvärde av korrosionsdjupet. Detta kan bestämmas genom direkt mätning eller genom beräkning ur massförlusten per ytenhet. Jämn korrosion sker i regel genom verkan av korrosionsceller utan särskiljbara anod- och katodytor.

3.1.2 Gropfrätning

Gropfrätning kallas lokal korrosion som resulterar i frätgropar på metallytan, se figur 3-3. Vid denna typ av korrosion verkar i allmänhet korrosionsceller med särskiljbara anod- och katodytor. Anoden är då belägen i frätgropen och katoden vanligen på omgivande ytor.



Figur 3-3. Frätgrop i stålplåt (Mattsson 2009).

3.1.3 Mikrobiell korrosion

Vid mikrobiell korrosion stimulerar mikroorganismer korrosionsprocessen antingen genom att själva delta i denna eller genom att göra miljön mer korrosiv. Angreppen är oftast lokala av typen gropfrätning. Mekanismerna för mikrobiell korrosion kan delas in i tre grupper:

- korrosion till följd av kemiska förändringar
- korrosion till följd av fysikaliska förändringar
- korrosion till följd av direkt elektronöverföring.

De kemiska förändringarna innebär antingen att mikroorganismerna stimulerar korrosionsprocessen genom att i ämnesomsättningen utnyttja produkter från korrosionsreaktioner eller att mikroorganismerna utsöndrar korrosiva ämnen.

De fysikaliska förändringarna innebär bildning av avlagringar på metallytan som i sin tur skapar luftningsceller.

Den tredje mekanismen bygger på att vissa typer av sulfatreducerande bakterier antas kunna ta upp elektroner direkt från metallytan.

De bakterier som har störst inverkan på kolstålets korrosion i jord och i naturliga vatten är:

- sulfatreducerande bakterier (SRB)
- svaveloxiderande bakterier
- järnoxiderande bakterier.

Mikrobiell korrosion orsakad av sulfatreducerande bakterier kallas också anaerob korrosion, eftersom den uppträder under syrefria förhållanden. Flera olika teorier finns som bygger på att bakterierna ger upphov till kemiska förändringar som antingen stimulerar katodreaktionen eller anodreaktionen. Vidare antas vissa typer av dessa bakterier kunna fungera som elektronupptagare och ge upphov till vad som kallas EMIC, en mikrobiell korrosion med extra hög korrosionshastighet.

De svaveloxiderande bakterierna orsakar korrosionsskador genom att oxidera oorganiskt svavel till H_2SO_4 och eftersom deras aktivitet inte hämmas av pH-sänkningen kan mängden producerad syra bli stor.

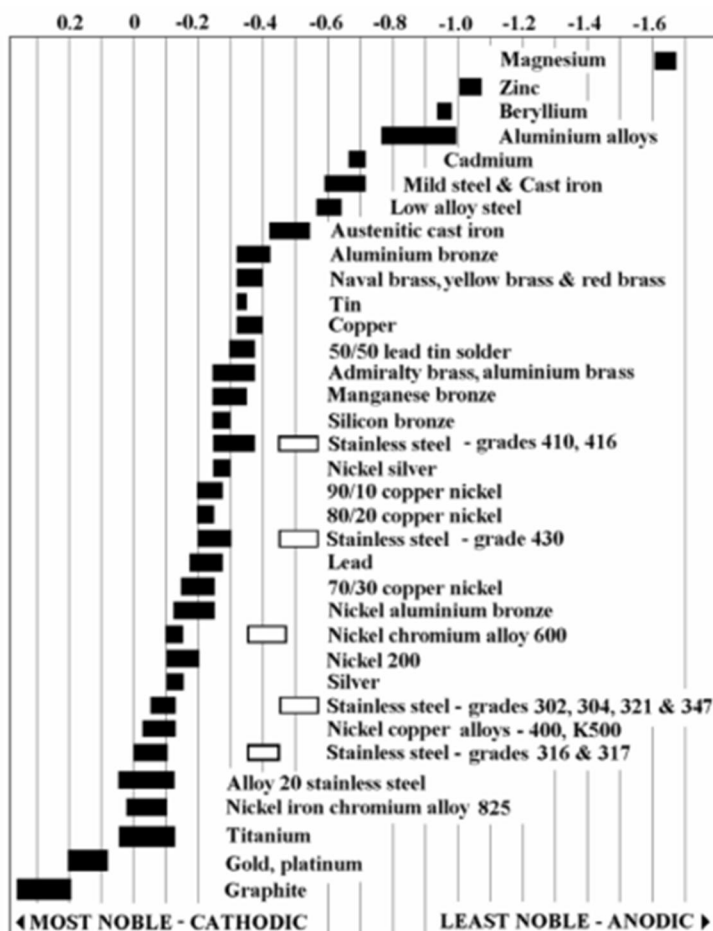
De järnoxiderande bakterierna skapar så kallade tuberkler. Tre olika mekanismer för hur korrosionen stimuleras, har föreslagits. För det första kan den av mikroorganismerna orsakade oxidationen av Fe^{2+} till Fe^{3+} stimulera anodreaktionen genom att Fe^{2+} - halten hålls på en låg nivå, för det andra ger tuberkelerna upphov till avlagringskorrosion och för det tredje erhålls under tuberkelerna en anaerob miljö där sulfatreducerande bakterier kan utvecklas och orsaka korrosion. Bidraget från den första mekanismen anses vara litet, Fe^{2+} jonerna kan finnas lösta i vattnet och behöver inte ha tillförts genom korrosion.

I många fall kan olika typer av bakterier samverka.

3.1.4 Galvanisk korrosion

Galvanisk korrosion uppstår då två olika ädla metaller sammankopplas och samtidigt befinner sig i en gemensam elektrolyt. Den minst ädla metallen angräps.

Information om olika metallers ädelhet erhålls ur galvaniska spänningsserier som tagits fram i olika typer av vätskor t.ex. havsvatten, se figur 3-4.



Figur 3-4. Galvanisk serie i havsvatten (Atlas 2010).

Fyra faktorer har betydelse för hur allvarlig den galvaniska korrosionen blir i varje enskilt fall, nämligen:

- Areaförhållandet mellan anod (oädlare materialet) och katod (ädlare materialet): Om anoden är liten i förhållande till katoden blir angreppsdjupet större än om det omvända gäller.
- Vattnets ledningsförmåga: Havsvatten leder ström bättre än sötvatten och korrosionen sker med högre hastighet.
- Potentialskillnaden mellan de båda metallerna: En stor potentialskillnad ökar drivkraften i processen.
- Om den ädlare metallen är passiverbar erhålls en lägre galvanisk korrosionshastighet. Således är rostfritt stål ädlare än koppar men den galvaniska korrosionen blir allvarligare på t.ex. aluminium vid sammankoppling med koppar än vid sammankoppling med rostfritt stål.

3.1.5 Läckströmskorrosion

Denna typ av korrosion orsakas av läckström från en elektrisk anläggning med någon spänningsförande del i kontakt med jorden eller vattnet. Det är i allmänhet endast likström som ger upphov till läckströmskorrosion på järn och stål. Läckströmskorrosion orsakad av likström följer Faradays lag, vilket innebar att avfrätningen på t.ex. en järn- eller stålyta blir 1,1 mm per år vid strömtätheten 1 A/m². Korrosionsangrepp på kolstål orsakade av växelström är ovanliga och uppstår endast vid en kombination av hög växelströmtäthet (>30 A/m²) och samtidig inläckande likström (katodiskt skydd).

3.2 Korrosion i jord

Innehållet i detta avsnitt kommer till stora delar från (Camitz 1994, Camitz 2009 och Mattsson 2009).

En jord är sällan homogen utan varierar i både horisontell och vertikal led. Heterogeniteten förstärks vid omgrävning. Egenskaperna ändras också med årstidsväxlingarna till följd av regn, snösmältning, upptorkning etc. Detta är i stora drag karaktären hos det medium för vilket jordförlagda konstruktioner exponeras.

Korrosionen i jord påverkas främst av följande faktorer: närvaro av jordvatten, tillförsel av syre, jordvattnets kemiska sammansättning, jordens redoxpotential, pH-värde och resistivitet samt mikrobiell aktivitet.

Vid allmän korrosion ligger anod- och katodområden nära varandra och korrosionsprodukterna bildar oftast en beläggning med viss skyddande verkan på stålytan. Korrosionshastigheten kan då i många fall avta med tiden. Under vissa förhållanden kan dock anod- och katodområdena ligga tydligt åtskilda. Avståndet kan på en kabel eller rörledning uppgå till många meter. De vid anoden bildade metalljonerna vandrar med strömmen mot katoden och de vid katoden bildade OH⁻-jonerna vandrar mot strömmen mot anoden. Korrosionsprodukterna fälls då ut i jorden ett stycke från anoden och ger då inte upphov till någon skyddande beläggning på anodytan.

Eftersom ingen skyddande beläggning bildas vid anoden, avtar inte korrosionshastigheten med tiden.

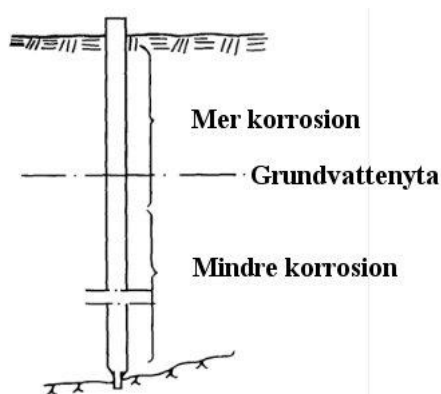
Lokal korrosion som leder till genomfrätning, kan orsaka allvarlig skada hos t.ex. en oljecistern eller rörledning, medan enstaka frätgropar vanligen är av mindre betydelse för bärande konstruktioner, t.ex. stålplåtar. För konstruktioner där utmattningslaster kan bli dimensionerande initieras dock sprickor från lokala gropar vilket försämrar utmattningskapaciteten.

För stålplåtar är i stället den jämna korrosionen utslagsgivande för den lastbärande förmågan. Vi kommer i det följande att skilja mellan:

- lokal korrosion typ gropfrätning
- lokal allmän korrosion d.v.s. en jämn korrosion som uppträder inom ett begränsat område
- allmän korrosion d.v.s. jämn korrosion över hela ytan.

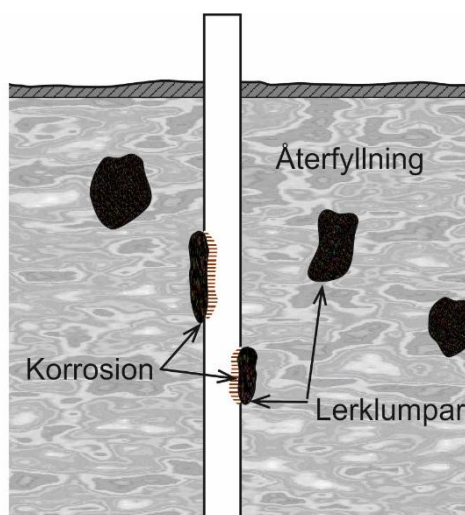
3.2.1 Olika jordars korrosivitet

För rörledningar, cisterner och andra stålkonstruktioner, som grävs ned relativt ytligt har jordens kemiska sammansättning och i viss mån även jordarten inverkan på korrosionen, både den jämna och lokala. Under grundvattenytan är korrosionshastigheten låg och oberoende av jordens kemiska sammansättning. För pålar och spont är därför jordens egenskaper endast av intresse ovanför grundvattenytan. Ett stycke under grundvattenytan och längre ner styr korrosionen helt av tillgången eller snarare bristen på syre. Korrosion av betydelse är således bara att förvänta i en zon från markytan och ner till en nivå strax under grundvattenytan, se figur 3-5.



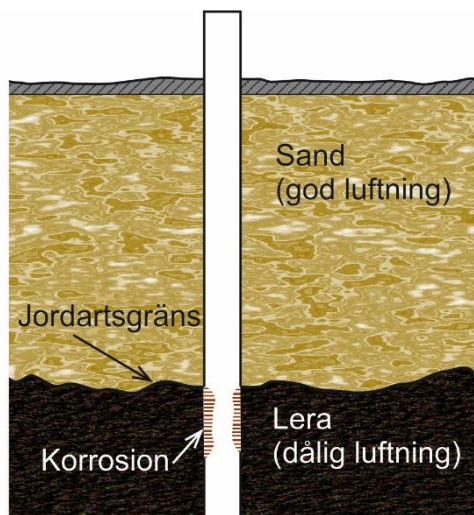
Figur 3-5. Korrosionszoner på en påle.

Genom att syrediffusionen till stållytan är förhållandevis god över grundvattenytan kan den lätt bli lokalt försämrad om man t.ex. 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 stållytan medan resten av ytan täcks av sand. Syretillförseln blir därigenom sämre under lerklumparna. Därvid uppstår en så kallad luftningscell vilket innebär att stållytan i den välluftade sanden blir katod medan ytan under lerklumparna blir anod och ett lokalt korrosionsangrepp utstår, se figur 3-6.



Figur 3-6. Korrosion till följd av luftningsceller orsakade av inhomogena schaktmassor i den luftade zonen ovanför grundvattenytan.

Luftningsceller kan också uppkomma vid skiktad jord. Står stålpielen 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 figur 3-7. Detta förhållande kan uppkomma särskilt över grundvattenytan medan skiktningar under grundvattenytan inte behöver innebära någon ökning av korrosionen.



Figur 3-7. Korrosion på pile orsakad av skiktad jord.

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

På lång sikt, efter flera decennier, återgår dock en omlagrad jord till ett tillstånd som, ur korrosionssynpunkt, liknar det ostörda tillståndet.

De egenskaper i jord som bedöms främst inverka på korrosionshastigheten på stål i jord, är således syrediffusionen och fuktförhållandena. Korrosionshastigheten kan också påverkas av en låg resistivitet i jorden (korrosionsströmmen flyter lättare) till följd av t.ex. hög salthalt i sedimenten såsom på Västkusten, där jorden avsatts i saltvatten. Ett lågt pH-värde ($\leq$ ca 4,5) och hög organisk halt, som bl.a. påträffas i torv, gyttja och sulfidjordar, kan också öka korrosionshastigheten. Ett högt pH-värde, såsom i kalkhaltig jord, minskar i stället korrosionshastigheten.

3.2.2 Mikrobiell korrosion

För mikrobiell korrosion av kolstål i jord är det särskilt två skilda grupper av bakterier som är av intresse, sulfatreducerande bakterier och svaveloxiderande bakterier. Deras inverkan på korrosionen av metallkonstruktioner skiljer sig åt. Sulfatreducerande bakterier är verksamma vid korrosion i anaerob (syrefri) jord, varför den största risken för mikrobiell korrosion genom dessa bakterier i första hand föreligger på konstruktioner i djup jord (under grundvattenzonen). Svaveloxiderande bakterier är verksamma vid korrosion i aerob (syrerik) jord, varför den största risken till följd av dessa bakterier i första hand föreligger på konstruktioner i ytjord (ovan eller i grundvattenzonen).

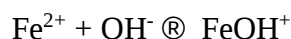
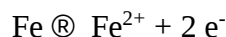
Det är känt att sulfatreducerande bakterier växelverkar med andra bakterier. I jord kan t.ex. sulfatreducerande bakterier samverka med svaveloxiderande bakterier. Vid perioder med god luftning är svaveloxiderande bakterier aktiva och vid sämre luftning är de sulfatreducerande aktiva. Denna växelverkan uppkommer genom årstidsberoende variationer av syretillförseln genom jorden (jordens luftning) och av grundvattennivåns läge. Denna växelverkan mellan olika bakteriearter har misstänkts kunna ge upphov till svåra korrosionsangrepp.

Den mikrobiella korrosionen är framför allt undersökt i laboratoriemiljö. I jord har endast ett fåtal fältundersökningar utförts. En förhållandevis omfattande fältundersökning genomfördes i Sverige (Vinka 2001). Stålprover exponerades i sju år på fyra olika platser med lera eller gyttjig lera, dels ovan dels under grundvattenytan. På varje plats undersöktes korrosionen och bakterieförekomsten och deras aktivitet på provplåtar och i omgivande jord.

Undersökningen visade att den massförlustbestämda korrosionshastigheten inte påverkades nämnvärt av variationer hos sulfatreducerande bakteriers antal eller aktivitet. Ett högt antal sulfatreducerande bakterier kan, men behöver inte, ge upphov till lokala korrosionsangrepp.

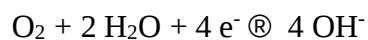
På kolstålsytor utan frätgropar bestod korrosionsprodukterna huvudsakligen av magnetit, vilket bildas i jord med långsam syretillförsel d.v.s. utan inslag av mikrobiell korrosion.

Schematiskt kan följande reaktionsformler uppställas:



Katodreaktionen innebärande syrgasreduktion kan ske både på järn och magnetit.

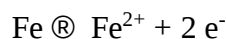
Syreöverspänningen är endast något högre på Fe_3O_4 än på Fe.



Vid lokala korrosionsangrepp påträffades siderit FeCO_3 och pyrit FeS_2 som korrosionsprodukter. Förekomsten av dessa föreningar tyder på mikrobiellt betingad korrosion.

Följande mekanism föreslogs av Vinka (Vinka 2001).

I frätgropen sker anodreaktionen:

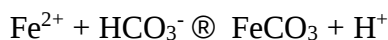


Fe^{2+} -jonerna hydrolyseras i viss grad till FeOH^{+} :



Huvuddelen av Fe^{2+} -jonerna transporteras till gropmynningen genom migration och diffusion.

I gropmyynningen sker utfällning av siderit FeCO_3 och järnsulfid som i första hand består av mackinawit Fe_{1+x}S :



och



Divätesulfid och vätekarbonatjoner, som ingår i dessa reaktioner, bildas vid sulfatreducerande bakteriers metabolism exempelvis laktatmetabolismen:



Hydrolysreaktionerna och utfällningsreaktionerna av FeCO_3 och FeS medför att frätgropslösningen försuras, vilket påskyndar korrosionsprocessen.

En orsak till att det inte uppstår någon allvarlig allmän korrosion under grundvattenytan i jordar med hög aktivitet av sulfatreducerande bakterier kan vara att halten frigjorda järnjoner är för låg. Man har nämligen visat att halten järnjoner måste vara tillräckligt hög för att kunna ta hand om all sulfid som bakterierna producerar (Smith 1975). Det är oxidationen av Fe^{2+} -jonerna i sig som skapar en högre korrosivitet, se avsnitt 3.1.3. Under grundvattenytan är syrehalten så låg och därmed också korrosionshastigheten att inte tillräckligt många järnjoner tillförs elektrolyten.

Det är således mycket svårt att förutsäga under vilka omständigheter som mikrobiell korrosion påskyndar den naturliga korrosionsprocessen i jord. Det verkar dock ganska klart att korrosionstypen inte påskyndar den allmänna korrosionen. I de fall angrepp uppstår är dessa av typen gropfrätning. Dessa lokala angrepp är av underordnad betydelse för bärande konstruktioner som pålar och spont undantaget konstruktioner där utmattningsslaster kan bli dimensionerande. Även för rörledningar och cisterner som är känsliga för lokal gropfrätning kan mikrobiell korrosion utgöra ett hot.

3.2.3 Galvanisk korrosion

Galvanisk korrosion uppstår om stålkonstruktionen är i kontakt med en ädlare metall t.ex. koppar. Även vissa icke-metaller är elektronledande t.ex. stenkolk och koks. Därför kan även dessa material ge upphov till galvanisk korrosion. För att galvanisk korrosion ska kunna ske krävs dock ett oxidationsmedel till katodprocessen, nämligen syre. Galvanisk korrosion p.g.a. kontakt med kol och koks är därför bara att förvänta ovanför grundvattenytan.

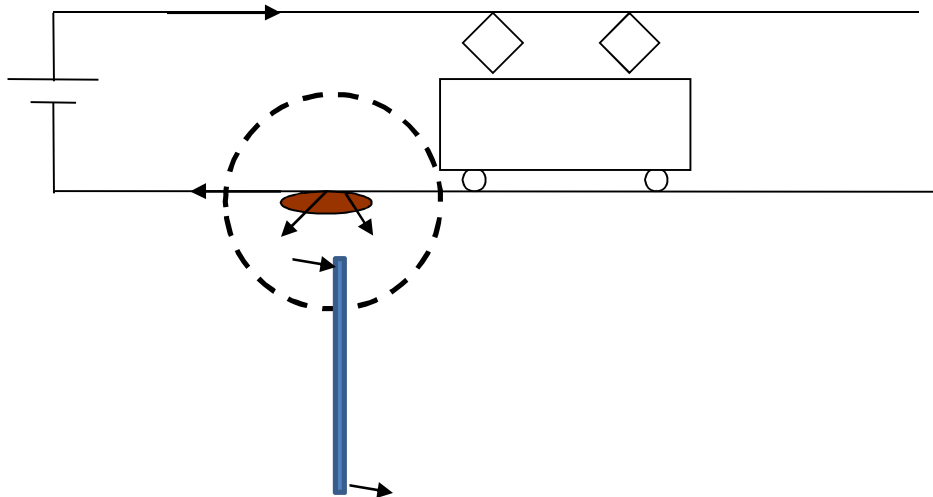
Risken för galvanisk korrosion på så stora konstruktioner som pålar och spont är liten. Areaförhållandet anod-katod blir, i princip alltid, gynnsamt. I kombination med de flesta jordars relativt höga resistivitet gör att den ädlare konstruktionen måste ha mycket stor area för att kunna orsaka någon skada om avsiktlig eller oavsiktlig kontakt uppstår. En tänkbar sådan konstruktion skulle kunna vara jordlinesystemet i marken under ett ställverk.

3.2.4 Läckströmskorrosion

Växelströmskorrosion är ingen risk för pålar och spont som saknar ytbeläggning.

Läckströmspåverkan orsakad av likström kan inte uteslutas om grundläggningen utförts i direkt närhet till en likströmsdriven järnväg. Två riskområden kan identifieras nämligen dels nära rälen dels nära ett jordtag som återtar från rälen utläckt ström.

Om ballastresistansen lokalt är låg kommer en del av den ström som återleds i rälen att läcka ut i omgivande jord. Runt denna punkt uppstår ett elektriskt fält som skulle kunna ge upphov till läckströmspåverkan på en närbelägen påle, se figur 3-8. Korrosion uppstår där strömmen lämnar konstruktionen, se figur 3-1.

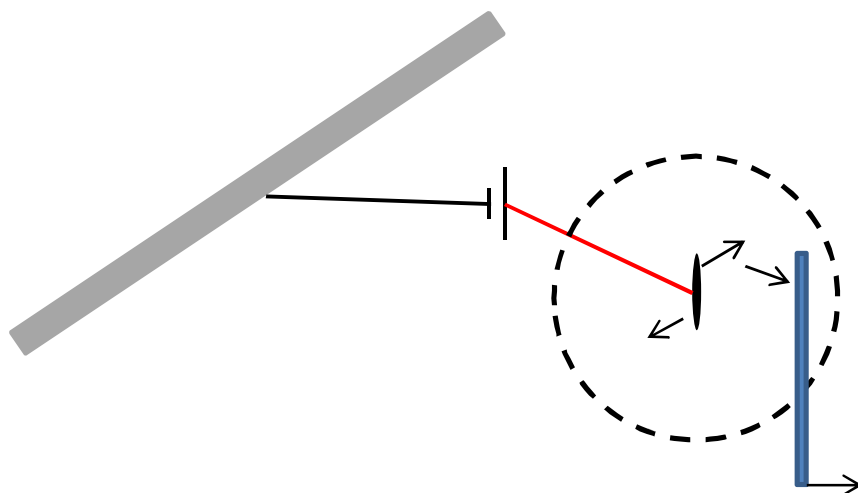


Figur 3-8. Riskområde för läckströmspåverkan i närheten av rälen.

De flesta likströmsbanor har endast ett fåtal jordtag, oftast vid depåer, där den ström som läckt ut från linjerna återförs. I anslutning till dessa jordtag finns också en förhöjd risk för påverkan.

Även vid den vanliga järnvägen (16 2/3 Hz) kan läckström till följd av likströmmar uppstå. På signalspårssträckor ligger en permanent likspänning på 5-6 V mellan den isolerade I-rälen och S-rälen. Även i detta fall kan elektriska fält uppstå runt rälerna om isolationen är nedsatt.

Bl.a. rörledningar och kablar i jord skyddas i vissa fall med katodiskt skydd. Om installationen är av typ påtryckt ström uppstår även i detta fall ett elektriskt fält runt anodbädden, se figur 3-9.



Figur 3-9. Riskområde runt en anodbädd ingående i ett katodiskt skydd med påtryckt ström.

Strömutmatningen från anodbäddar överstiger sällan 10 A. Betydligt högre strömmar matas ut från elektroder tillhörande högspända likströmsöverföringar, upp mot 1500 A förekommer. Dessa elektroder placeras en bit ut från kusten och på behörigt avstånd från tätare bebyggelse.

3.3 Korrosion i vatten

3.3.1 Olika vattens korrosivitet

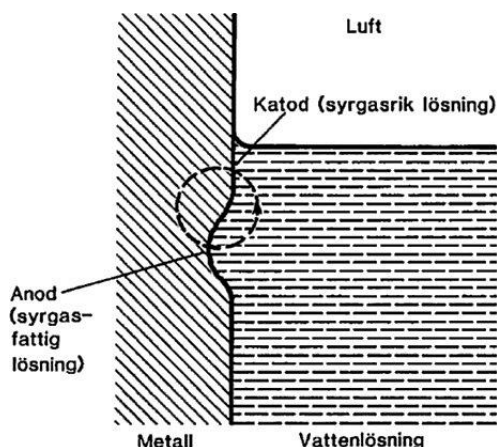
I korrosionssammanhang skiljer man vanligen mellan två huvudtyper av vatten: sötvatten och havsvatten.

Sötvattnets korrosivitet är beroende av sådana faktorer som syrehalt, pH-värde samt koncentrationen av Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , Cl^- och SO_4^{2-} . Avgörande betydelse för vattnets korrosivitet har dess halt av löst syre, eftersom detta ämne medverkar i katodreaktionen. Vid brist på syre saknas vanligen verksamt oxidationsmedel, varför katodreaktionen och därmed hela korrosionsprocessen uteblir. Syrets löslighet i vatten, som står i kontakt med luft, avtar med temperaturen, se tabell 3-1.

Tabell 3-1. Syrets löslighet i vatten som står i kontakt med luft av atmosfärstryck vid olika temperaturer.

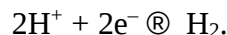
Temperatur, °C	Löslighet, mg/l
0	14,6
20	9,1
40	6,4
60	4,7
80	2,8
100	0,0

Syrehaltens betydelse för korrosionen framgår också av att ett föremål som endast delvis är nedsänkt i vatten i regel får det kraftigaste angreppet omedelbart under vattenytan, se figur 3-10. Lokal korrosion av detta slag kallas vattenlinjekorrosion.



Figur 3-10. Vattenlinjekorrosion.

I vatten med ett pH-värde mindre än ca 4, kan exempelvis kolstål korrodera med avsevärd hastighet också i frånvaro av syre. Under sådana förhållanden kan nämligen H^+ -joner verka som oxidationsmedel enligt formeln:



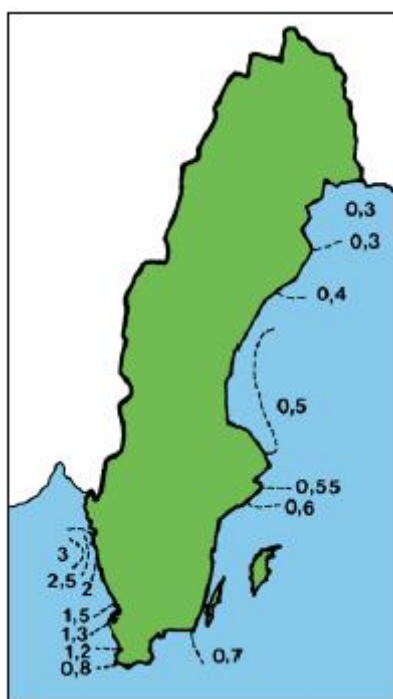
Korrosionsrisken är också beroende av förutsättningarna för kalkutfällning i vattnet enligt formeln:



Kalken kan nämligen tillsammans med bildade korrosionsprodukter ge en skyddande beläggning på metallytan. Vid ett pH-värde högre än den s.k. kalkfällningspunkten (pH_s) är vattnet kalkfällande. Vid lägre pH-värde har vattnet inte denna förmåga utan verkar tvärtom lösande på en eventuell kalkutfällning.

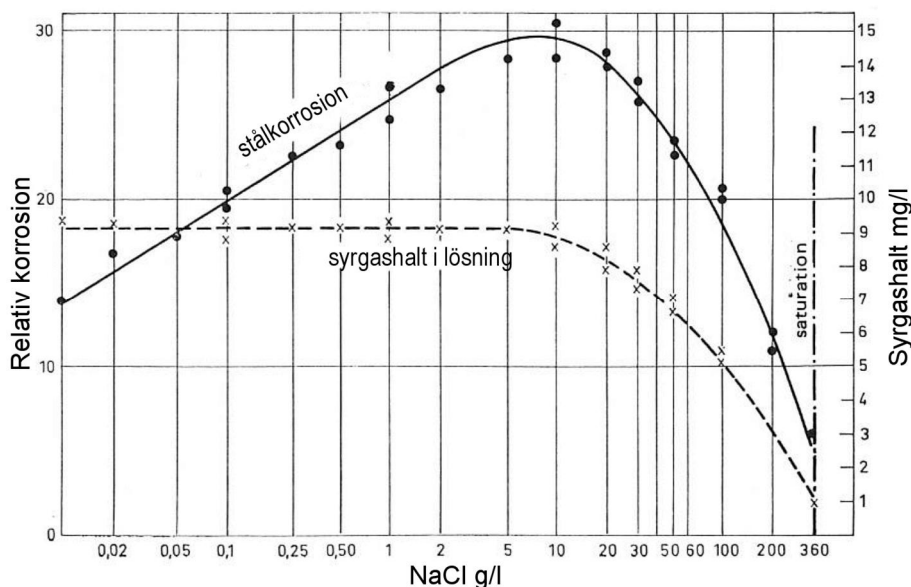
Rent havsvatten i de stora oceanerna har i det närmaste konstant sammansättning och korrosivitet. Dess pH-värde avviker inte mycket från 8,1 och masshalten salt är ca 3,5 procent, i huvudsak NaCl. I hamnar och även på andra ställen i närheten av land kan havsvatten dock ha avvikande sammansättning. Detta beror på utflöde av vattendrag eller utsläpp av förorenat avloppsvatten. Vid flodutlopp skiktas sig ofta vattnet med det söta vattnet ovanpå det salta.

Hos Östersjövattnet avtar NaCl-halten alltmer, ju större avståndet till Atlanten blir, se figur 3-11.



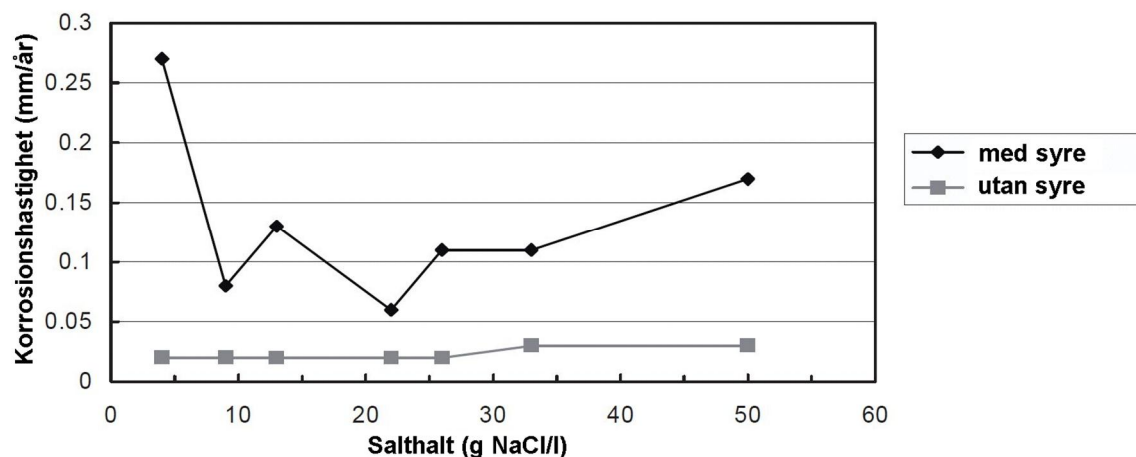
Figur 3-11. Havsvattnets salthalt (% NaCl) vid Sveriges kuster.

Hur salthalten påverkar korrosionshastigheten har studerats i en rad undersökningar. I figur 3-12 visas resultaten vid provning i en ren NaCl-lösning.



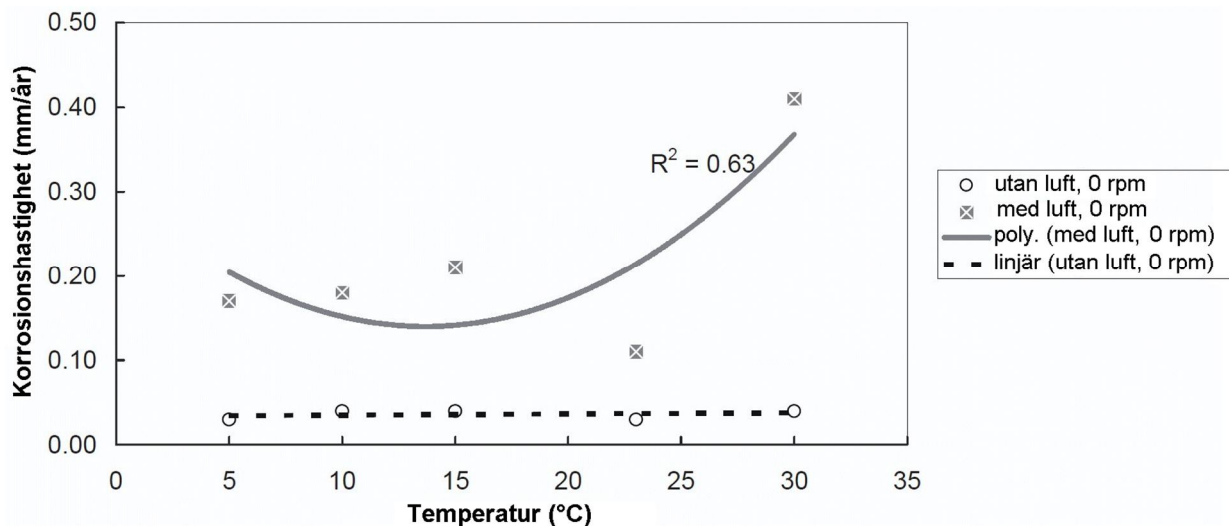
Figur 3-12. Syrets löslighet och korrosionens storlek vid olika salthalter (Dechema 1992).

I intervallet 1-3 % (10-30 g NaCl/l) varierar inte korrosionshastigheten särskilt mycket med salthalten. Detta bekräftas av försök utförda i syntetiskt havsvatten, se figur 3-13.



Figur 3-13. Korrosionshastigheten som funktion av salthalten i syntetiskt havsvatten vid 23°C (Houyoux 2007).

En annan viktig faktor är vattnets temperatur. Normalt ökar korrosionshastigheten med temperaturen. Denna effekt motverkas dock av att syrets löslighet sjunker med ökande temperatur, se tabell 3-1. Försök i syntetiskt havsvatten har visat att korrosionshastigheten i princip är konstant mellan 5 och 20°C, se figur 3-14.



Figur 3-14. Korrosionshastigheten som funktion av temperaturen (Houyoux 2007).

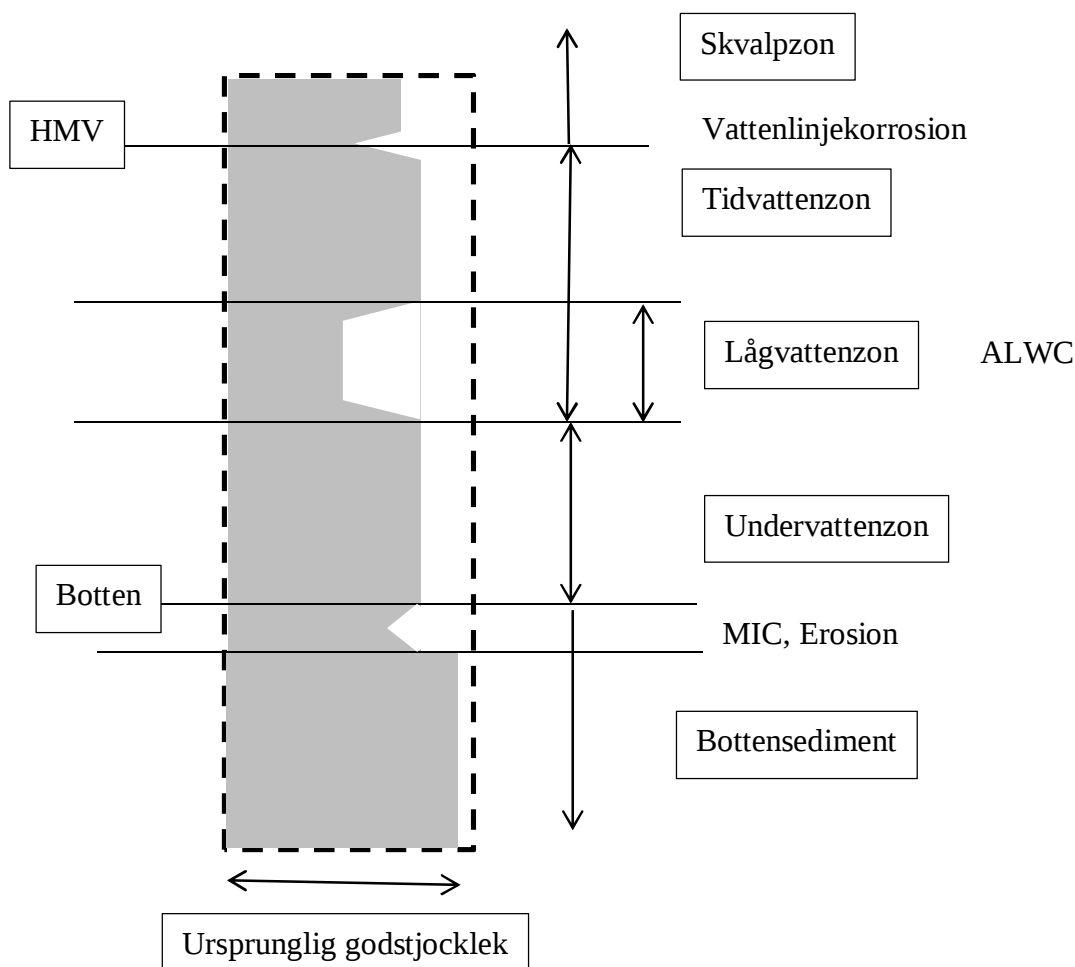
I naturligt havsvatten visar dock undersökningar att korrosionshastigheten är högre i varmare vatten. Detta anses bero på att naturligt havsvatten till skillnad från syntetiskt innehåller mikroorganismer som orsakar påväxt av såväl mikro- som makroorganismer. Påväxten kan orsaka avlagringskorrosion och mikrobiell korrosion, se avsnitt 3.3.2. Den mikrobiella aktiviteten är högre i varmare vatten. Påväxten har därför betydligt mindre omfattning i Östersjön än i saltrikare och varmare havsområden. I Östersjön utgörs påväxten främst av blåmusslor och vegetationsperioden är i huvudsak begränsad till juli–september.

För pålar och spont i vatten kan man identifiera olika korrosionszoner:

- atmosfärisk zon
- skvalpzon
- tidvattenzon
- lågvattenzon
- undervattenzon
- bottenzon.

Hur allvarlig korrosionen blir i de olika zonerna beror på var i världen man befinner sig. På USA:s östkust har rapporterats höga korrosionshastigheter i skvalpzonen från högsta medelvattenytan och uppåt (höga vågor) samt vid botten (eroderande sand).

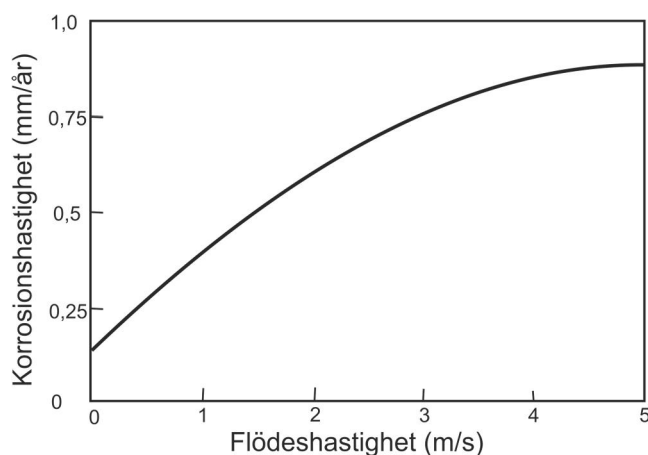
Utmed den europeiska Atlantkusten har man identifierat två kritiska zoner dels vid högsta medelvattenytan dels vid en lågvattenzon som ligger vid de nedre delarna av tidvattenzonen, se figur 3-15.



Figur 3-15. Principiella korrosionszoner på spont vid Europas Atlantkust (HMV=medelvattenstånd vid högvatten, ALWC=accelererad lågvattenkorrosion).

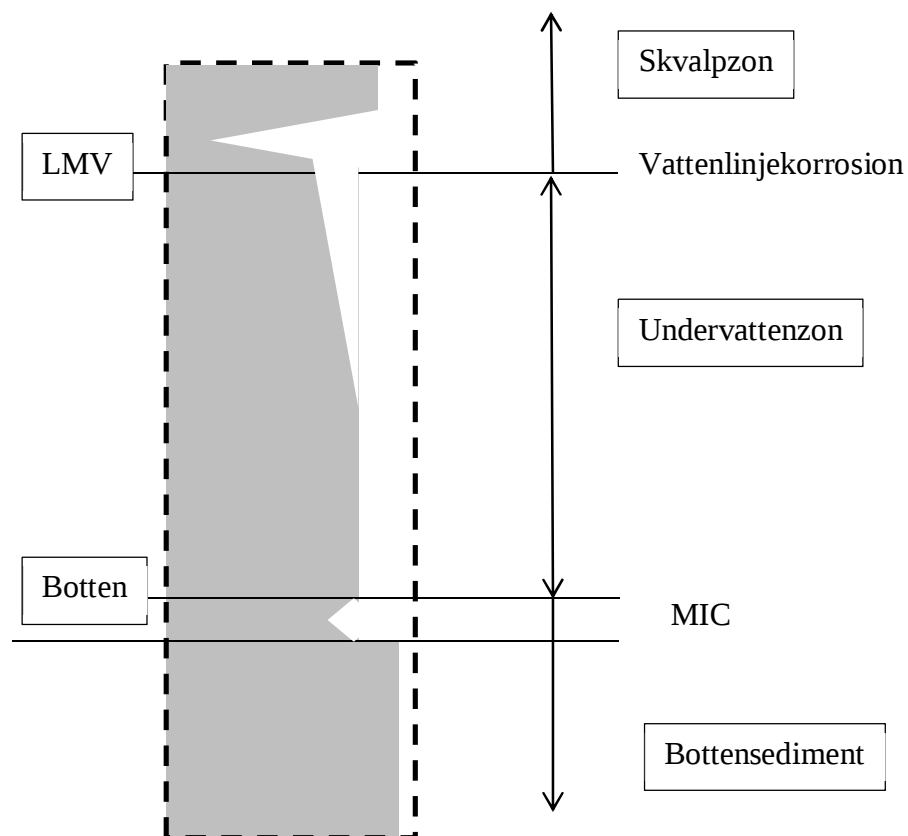
Vid den högsta medelvattenytan uppstår så kallad vattenlinjekorrosion. Angreppen i lågvattenzonen verkar uppstå då man har stora variationer i tidvatten. Korrosionen benämns ALWC (accelerated low water corrosion). Korrosionsmekanismen är under debatt men mycket tyder på att det är någon form av mikrobiell korrosion, se även avsnitt 3.3.2.

Korrosionshastigheten i undervattenzonen och i bottensedimenten är lägre än i de båda ovan beskrivna zonerna. Visserligen påtalas risken för mikrobiell korrosion i de övre bottensedimenten men några rapporterade korrosionshastigheter finns inte att tillgå (Breakell 2005). I figur 3-15 har ändå denna zon markerats som en potentiell risk. I kraftigt strömmande vatten och med sandbotten kan även erosionsskador uppstå vid botten. I hamnar med sjöfart är även erosionsskador orsakade av propellerrörelser vanliga i undervattenzonen. Hur flödeshastigheten påverkar korrosionshastigheten för kolstål i havsvatten framgår av figur 3-16.



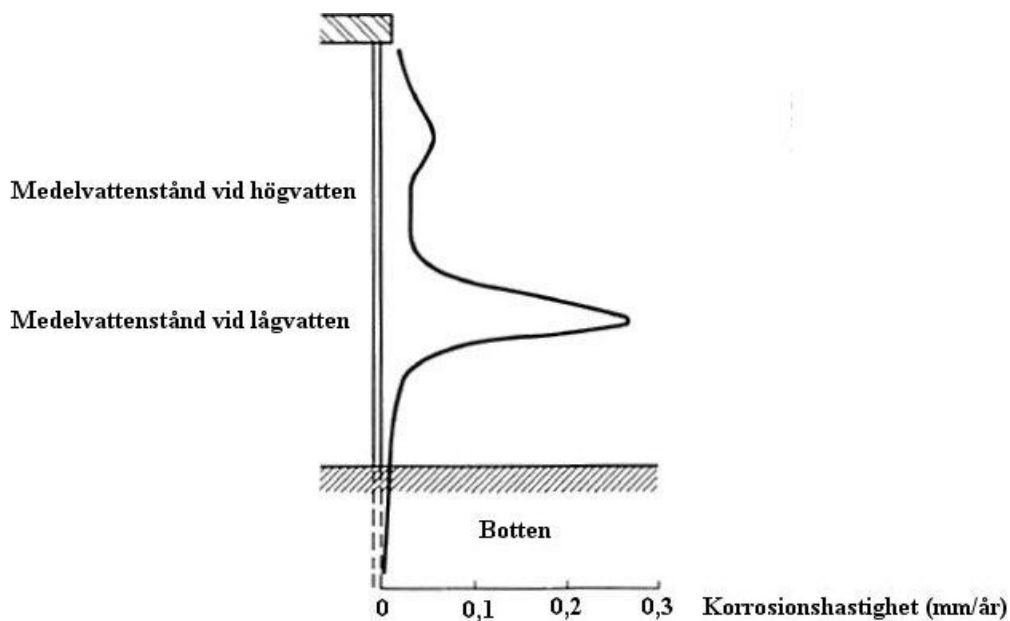
Figur 3-16. Korrosionshastigheten i havsvatten som funktion av flödeshastigheten (Dechema 1992).

I Östersjön, där tidvattenvariationerna är små, finns endast en zon med extra hög korrosion, nämligen i ett band mellan medelvattenytan och lägsta medelvattenytan, se figur 3-17. Även i detta fall bör vi beakta risken för MIC i de övre bottensedimenten.

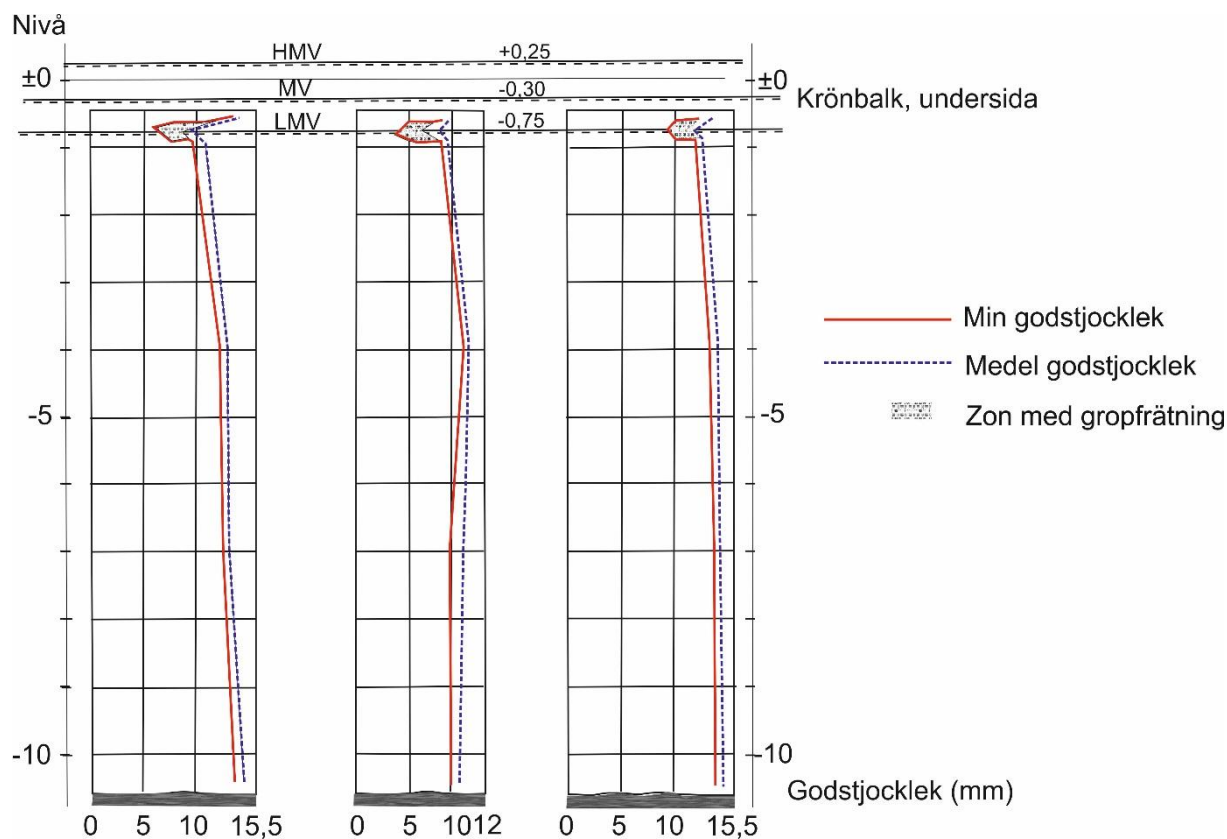


Figur 3-17. Principiella korrosionszoner på spont i Östersjön (LMV=medelvattenstånd vid lågvatten).

Den stora skillnaden mellan kustområden med respektive utan tidvatten framgår vid en jämförelse mellan figur 3-18 och 3-19. Figur 3-18 är från den Nederländska Atlantkusten och figur 3-19 från Stockholms frihamn.



Figur 3-18. Korrosionsprofil för spont i nederländsk hamn på Atlantkusten (efter Hein 1990).



Figur 3-19. Korrosionsprofil på spont i bräckt Östersjövatten i Stockholm (efter Eriksson 1985). HMV=medelvattenstånd vid högvatten, MV=medelvattenstånd, LMV=medelvattenstånd vid lågvatten.

Dessa principiella skillnader mellan förhållandena med och utan tidvatten bekräftas av flera undersökningar bl.a. Zen (1974) och Alberts (1997). I den senare återfinns figuren som återges i figur 3-20. Denna visar skillnaden mellan Nordsjön och södra Östersjön. Erfarenheten från ett stort antal inspektioner är att det endast är i den mest utsatta zonen (lågvattnen) som lokal korrosion i form av gropfrätning förekommer. I undervattenszonen kan man således räkna med att angreppen primärt sker som jämn korrosion.

Nordsjön				Södra Östersjön			
Sponttjocklek	Höjdzon	Jämn korrosion	Lokal korrosion	Sponttjocklek	Höjdzon	Jämn korrosion	Lokal korrosion
	Skvalpzon	●	○		Skvalpzon	○	—
	Tidvattenzon	○	—		Lågvattenzon	●	●
	Lågvattenzon	●	●		Högvattenzon	○	
	Högvattenzon	○	—				
● Kraftig korrosion ○ Svag korrosion — Ingen synlig korrosion							

Figur 3-20. Typiska korrosionszoner på spont i Nordsjön respektive Östersjön (efter Alberts 1997).

Den korrosionsprofil som visas i figur 3-19, med en mycket utpräglad korrosionszon strax under medelvattenlinjen, verkar gälla genomgående för svenska vatten från havsvatten på västkusten till bräckt vatten i Östersjön och Bottenhavet samt i sötvatten. Förklaringen är de mycket små tidvattenvariationerna. Angreppen i den kritiska zonen strax under medelvattentan kan också förstärkas av isrörelser som nöter bort skyddande korrosionsprodukter. I hamnar med sjöfart kan dock angrepp även uppstå längre ner på sponten p.g.a. erosion från propellerrörelser.

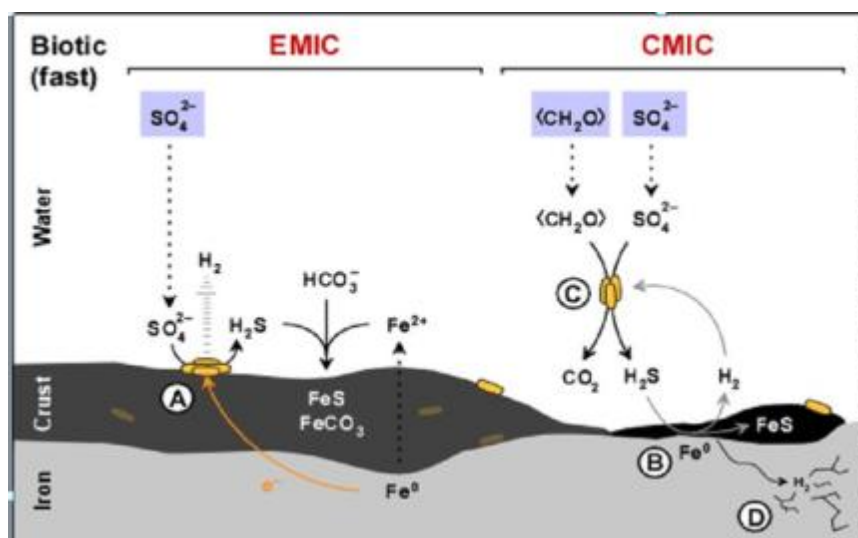
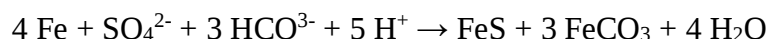
3.3.2 Mikrobiell korrosion

Riskerna för hög korrosionshastighet p.g.a. mikrobiell korrosion är större i vatten än i jord p.g.a. större tillgång till näring och åtminstone periodvis gynnsammare temperaturer. Förr ansåg man att mikrobiell korrosion (MIC) endast uppstod i bottensediment och på platser med förorenade sediment. Idag förknippas MIC i första hand med ALWC d.v.s. lokalt hög korrosion i lågvattenlinjen orsakad av sulfatreducerande bakterier (SRB). Bakterierna omvandlar sulfatjoner till sulidjoner. För sin metabolism kräver bakterierna en anaerob miljö och tillgång till näring. En betydande del av näringen och energin kan erhållas genom samverkan med andra bakterier, ofta aeroba. Det har nämligen visat sig att periodisk exponering för aerob miljö påskyndar metabolismen hos SRB. I miljöer som är omväxlande aeroba och anaeroba kan sulfider från SRB oxideras av aeroba svaveloxiderande bakterier vilket medför pH-sänkning, se avsnitt 3.1.3.

Att ALWC uppträder just i lågvattenlinjen skulle i så fall vara en effekt av dessa växlingar (Paik 2008). ALWC karakteriseras av tuberkler, skapade av järnoxiderande bakterier. Inuti tuberkelerna erhålls en anaerob miljö där de sulfatreducerande bakterierna kan utvecklas (Eist-rat 1980).

Som framgått av tidigare beskrivningar av mikrobiell korrosion så är mekanismerna komplicerade och inte fullt klarlagda. För att få ett kvantitativt mått på den mikrobiella korrosionens storlek kan vi ansätta att den av SRB genererade sulfiden reagerar med de vid korrosionsprocessen frigjorda Fe^{2+} -jonerna och bildar FeS . Som ett konservativt värde skulle i så fall den vid stålytan tillgängliga sulfiden svara mot en viss korroderad mängd järn. Tillgänglig mängd sulfid beror i sin tur av producerad mängd sulfid och med vilken hastighet den transporteras till stålytan.

Ovan beskrivna typ av mikrobiell korrosion kallas även CMIC (chemical microbially influenced corrosion). Den på senare år föreslagna processen EMIC (electrical microbially influenced corrosion) innebär att bakterierna fungerar som direkta elektronmottagare. I denna process, se figur 3-21, skulle en mol sulfid svara mot 4 mol järn enligt följande formel:



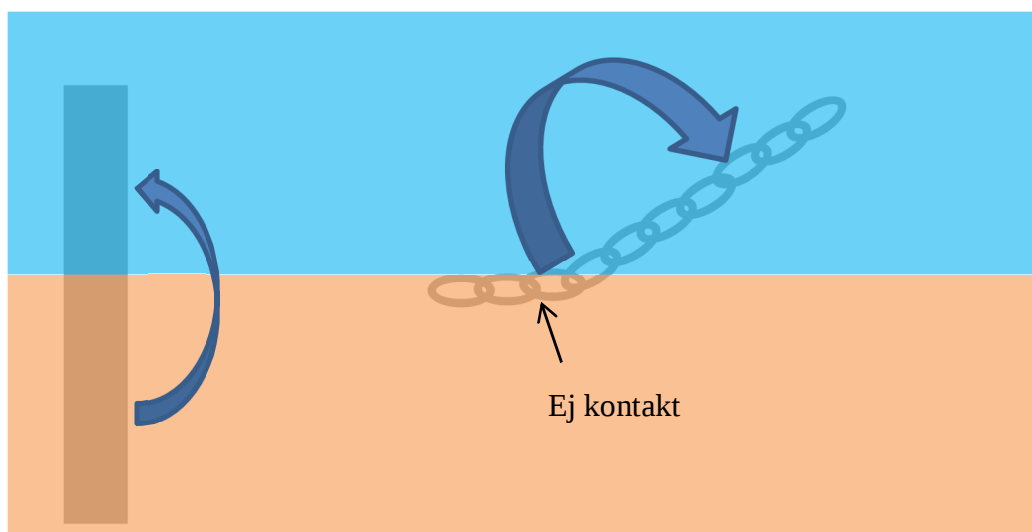
Figur 3-21. Skillnad mellan CMIC och EMIC (Enning 2014).

3.3.3 Galvanisk korrosion

Spontens och pålarnas stora yta gör det svårt att föreställa sig någon situation då de blir utsatta för galvanisk korrosion i salt eller bräckt vatten eftersom det skulle krävas en mycket stor ädel yta för att förorsaka detta angrepp. En viss lokal galvanisk korrosion kan inte uteslutas i vatten med lägre konduktivitet. Denna uppstår då i direkt anslutning av t.ex. en rostfri konstruktion monterad på sponten.

Armeringen i luftad betong är ädlare än stål i vatten medan armering i vattenmättad betong är mindre ädel än stål i vatten. En nedgjuten krönbalk skulle teoretiskt sett kunna ge upphov till galvanisk korrosion på underliggande stålspons i ett inledande skede innan betongen blivit vattenmättad. Praktiska erfarenheter visar dock att någon galvanisk korrosion inte uppstår.

Galvanisk korrosion p.g.a. en luftningscell kan uppstå i övergången mellan en anaerob botten och ovanliggande aeroba vatten. Stålet i den anaeroba botten får en betydligt negativare korrosionspotential än stålet i vattnet och blir anod i den galvaniska luftningscellen, se figur 3-22. För spont och pålar har denna luftningscell endast en marginell påverkan, troligen p.g.a. att anodytan i bottensedimenten är förhållandevis stor och därmed blir den anodiska strömtätheten låg. Skadefall har dock rapporterats från bottenkättingar till oljeplattformer (Sandberg 2012). I detta fall kan areaförhållandet anod:katod bli ogynnsamt om de enskilda länkarna som ligger i bottensediment inte har tillräcklig kontakt med varandra. Enstaka länkar kan då fungera som anod för hundratals katodiska länkar i vattnet och korrosionshastigheten blir hög.



Figur 3-22. Luftningscell på stålkonstruktioner delvis exponerade i anaeroba bottensediment och delvis i syresatt vatten.

Under initialskedet kan man få galvanisk korrosion mellan olika delar av varmvälsade stålprodukter, t.ex. pålar eller spont. Ytor med intakt glödskalet utgör då katod och rostar inte medan ytor med skadat glödskalet korroderar under inverkan av det ädla glödskalet. Med tiden bryts glödskalet ner varvid denna galvaniska korrosion upphör (Uhlig 2011).

3.3.4 Läckströmskorrosion

Spont och pålar i vatten kan exponeras för läckströmmar. Störst är risken i kommersiella hamnar. Här kan påverkan från likströmmar härröra från kranar eller svetsarbeten. Vidare kan så kallad sekundärverkan uppstå från katodiska skydd med påtryckt ström installerade på fartygsskrov.

Utanför hamnområden behöver endast läckströmskorrosion beaktas i närområden till anläggningar för högespänd likström (HVDC). Om anläggningen medger strömåterledning via jord kan påverkan uppstå på många km avstånd.

4. Erfarenheter av korrosion på stålplåtar och spont i jord

En litteratursammanställning utfördes av Korrosionsinstitutet i början på 90-talet (Camitz 1994). Denna uppdaterades 2009 (Camitz 2009) med ett flertal svenska undersökningar (Bengtsson 2002, Vinka 1997-2011) varav många inte är publicerade. 2014 har en kompletterande sökning genomförts inom ramen för detta projekt för att klarlägga om några ytterligare arbeten finns publicerade internationellt (Engblom 2014).

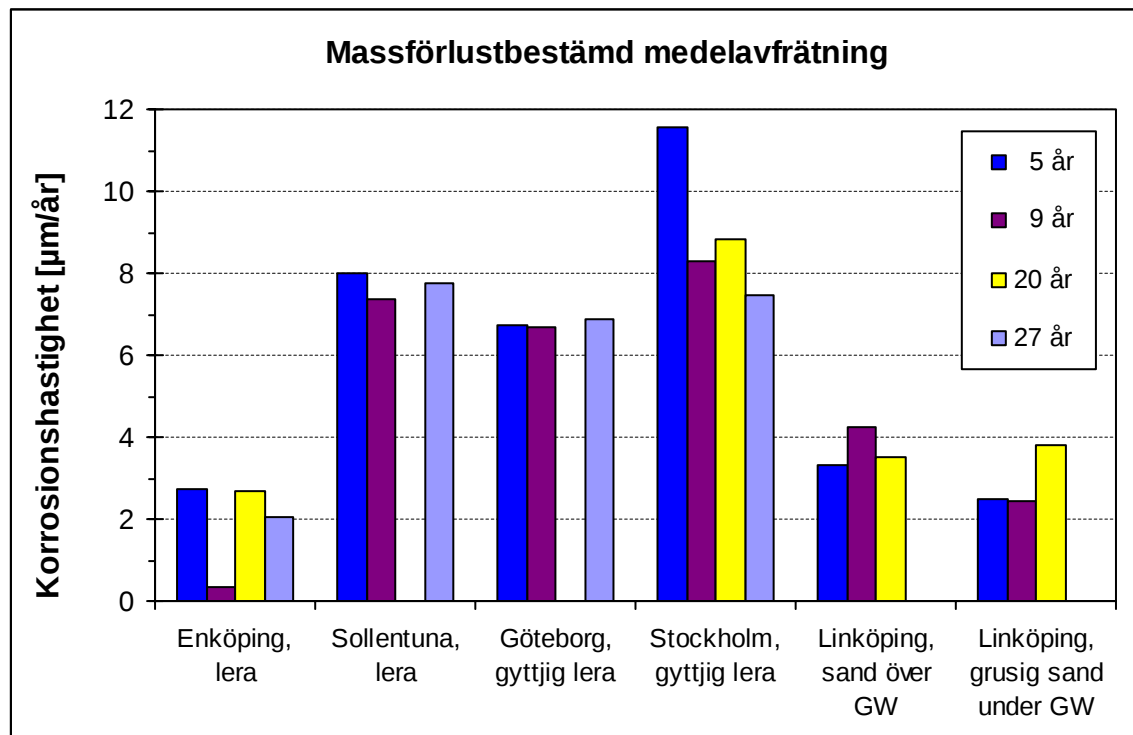
4.1 Svenska jordars korrosivitet

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

I framförallt städer utgörs de övre jordlagren ofta av fyllnadsmaterial. Ordet fyllnadsmaterial har en mycket allmän innebörd. Följande definition finns: ”Fyllnadsmaterial är allt material som är avlagrat på de orörda kvartära avlagringarna eller berggrunden. Det består av material framställt av människan eller av omflyttade och omblandade jord- och bergmassor”.

4.2 Korrosionens utveckling med tiden

Korrosionshastigheten avtar under de första 3–5 åren, efter det att pålen drivits ned i jorden. Därefter är korrosionshastigheten i det närmaste konstant, se figur 4-1.



Figur 4-1. Medelavfrätningen på pålar, efter olika långa exponeringstider, i olika för Sverige typiska jordarter (Vinka 2011b).

Figur 4-1 visar att medelavfrätningen inte förändras med tiden efter 5 år. Av kanske ändå större intresse är hur den maximala korrosionen förändras i tiden. Som kommer att framgå av det kommande avsnittet uppstår de kraftigaste angreppen strax under grundvattenytan och är orsakade av en luftningscell. Som påtalades i avsnitt 3.2 uppstår inga skyddande beläggningar av korrosionsprodukter om man har åtskiljda anod- och katodytor och därmed ingen minskning av den maximala korrosionshastigheten i tiden. Detta talar för att den maximala korrosionen, i likhet med medelavfrätningen, inte förändras i tiden.

4.3 Inverkan av jordart och placering

Ett antal långtidsexponeringar av vertikala stålkonstruktioner i jord (Romanoff 1962, Romanoff 1969, Tungesvik 1976, Ohsaki 1982, Vinka 2011b) har kommit fram till två gemensamma och väsentliga slutsatser, nämligen:

- Ett stycke under grundvattenytan och längre ner är korrosionshastigheten mycket låg, 2-10 µm/år.
- Dålig eller ingen korrelation mellan korrosionshastighet och jordparametrar.

Grundvattenytans stora betydelse framkommer i flera undersökningar (Troselius 1991, Vinka 2007, Vinka 2011a, Vinka 2011b). Slutsatserna från Troselius undersökningar var följande:

- På en konstruktion, som står i grundvattnet, uppstår det en utpräglad ”korrosionszon” på konstruktionen kring grundvattenytan.
- Ligger grundvattenytan konstant nära markytan (inom någon decimeter från markytan) uppstår ett skarpt avgränsat parti med förhöjd avfrätning på stången.
- Varierar grundvattennivån med årstiderna blir den maximala avfrätningen mindre genom att angreppet sprids ut över en större del av stången.
- Den maximala avfrätningen blir lägst där grundvattenytan konstant, under hela året, ligger under stången.

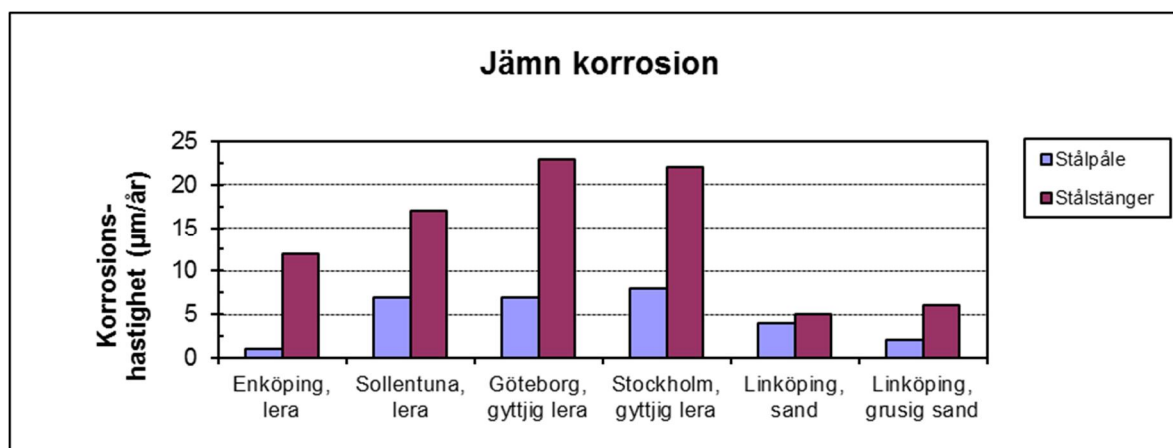
Resultaten från undersökningen visas i tabell 4-1.

Tabell 4-1. Maximal avfrätning och medelavfrätning på vertikalt nedgrävda provstänger (Troselius 1991).

Jord	Maximal avfrätning, $\mu\text{m}/\text{år}$	Medelavfrätning, $\mu\text{m}/\text{år}$
Lerjordar	13-82	6-8
Torvjordar	29-40	4-8
Moränjordar	5-19	2-8

Provstängerna som utnyttjas i undersökningen sträckte sig genom markbandet. De högsta korrosionshastigheterna uppstod strax under markbandet i de fall då grundvattnet stod ända upp i markytan. Att detta är ett extremfall har visats i en annan undersökning (Vinka 2011a) där också stålrören gick genom markbandet. I en marin lera med hög kloridhalt och en grundvattenyta endast 0,3 m under markytan noterades den högsta avfrätningen, 87 $\mu\text{m}/\text{år}$.

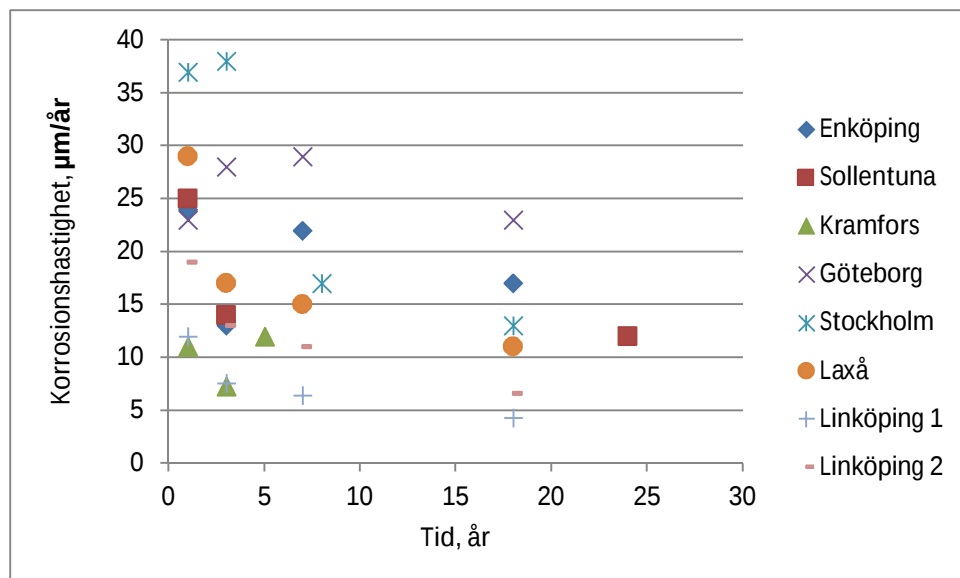
Att korrosionshastigheten, i zonen ovanför grundvattenytan, ökar då den omgrävs har påvisats genom att på samma platser både gräva ner stålstänger och slå ner stålpålar. I båda fallen vertikalt stående och med överkanten 0,5 m under markytan, se figur 4-2.



Figur 4-2. Jämförelse mellan korrosionshastigheten på nedslagna stålpålar och nedgrävda vertikala stålstänger (Camitz 2009).

VTT har bearbetat en stor mängd korrosionsdata från olika exponeringar (Törnqvist 2004). Man verifierar de svenska resultaten och konstaterar att korrosionshastigheten är dubbelt så hög i omrörd jord jämfört med ostörd jord. Det samma gäller för fyllnadsjord. Även Norin (2003) har visat att korrosionshastigheten är högre i fyllnadsjord än i ostörd jord. Någon skillnad i korrosionshastighet mellan naturlig omrörd jord och omrörda fyllnadsmassor kunde inte påvisas.

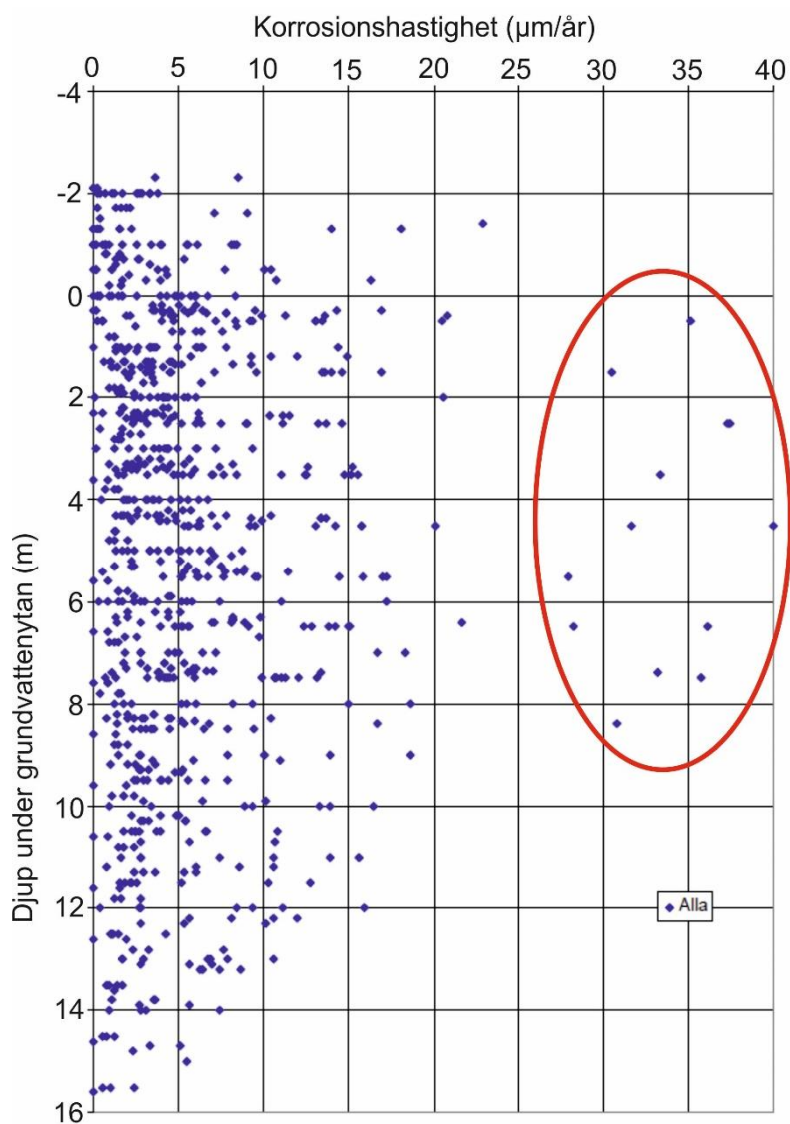
Långtidsexponering av små stålplåtar, både över och under grundvattenytan, visar att effekten av den ursprungliga omrörningen/syresättningen kvarstår under minst 25 år, se figur 4-3, Vinka (2014b).



Figur 4-3. Korrosionshastigheten (medelvärde av trippelprov) som funktion av tiden för stålprover exponerade ovan grundvattenytan i olika omgrävda jordar (Vinka 2014b).

Ett mycket omfattande exponeringsprogram genomfördes av SJ (Sandegren 1988) som under en 30 årsperiod exponerade provstänger på 19 olika platser i Sverige. Varje stång utgjordes av sammanfogade 1 m långa delstänger. Stängerna slutade ca 0,5 m under markytan. Resultaten från utvärdering av totalt 836 delstänger har behandlats statistiskt (Bengtsson 2002). Utvärderingen ansågs ge ett stöd för hypotesen att hastigheten för medelkorrosionen kan bedömas utgående från jordtyper. Mindre korrosion i de sandiga/grusiga jordarna och en något större korrosion i de oorganiska leriga/siltiga jordarterna samt störst korrosion i de organiska jordarterna.

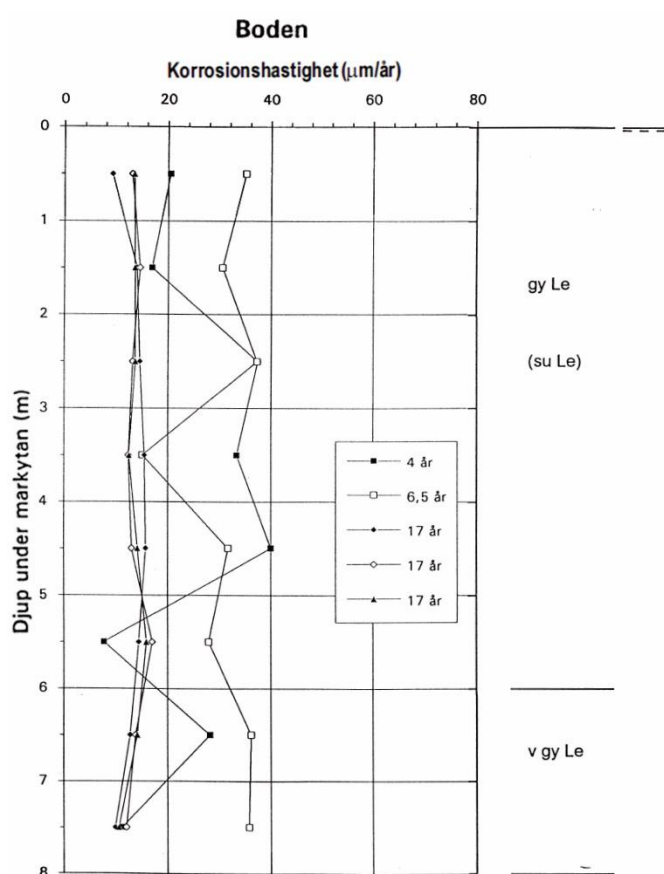
Man påstod sig inte kunna se någon skillnad mellan korrosionshastigheten över respektive under grundvattenytan, i direkt konflikt med övriga undersökningar. På de allra flesta provplatser låg dock grundvattenytan mycket nära markytan d.v.s. den helt dominerande majoriteten delstänger var exponerade under grundvattenytan. I figur 4-2 redovisas korrosionshastigheten för samtliga delstänger mot det vertikala läget i förhållande till grundvattenytan. Märkligt höga korrosionshastigheter redovisas för djup långt under grundvattenytan.



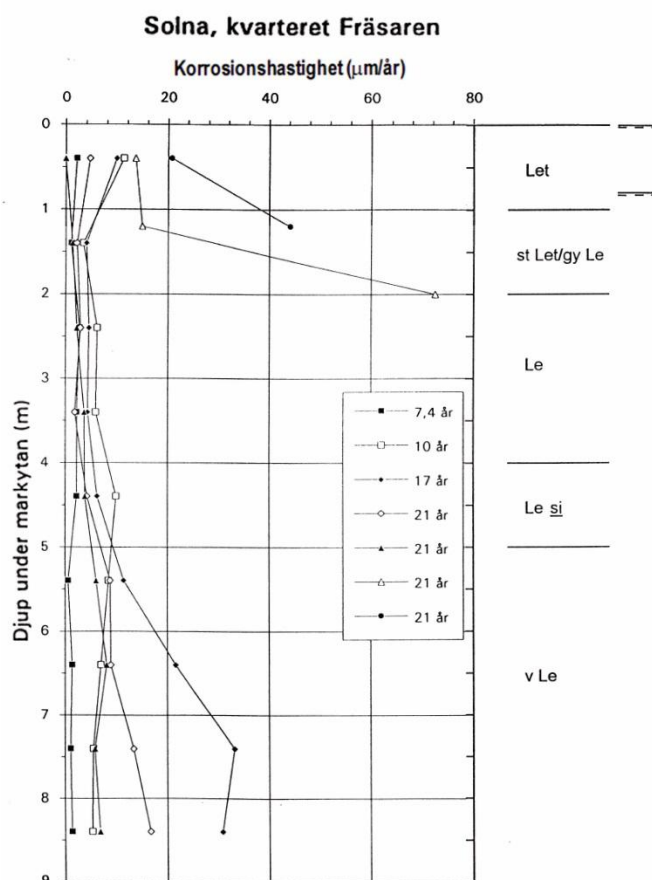
Figur 4-2. Korrosionshastigheten mot djupet under grundvattenytan för alla jordarter (efter Bengtsson 2002).

I tolv fall låg korrosionshastigheten över 25 $\mu\text{m}/\text{år}$. Tio av dessa representerar korta exponeringstider (<6,5 år) i sulfidhaltig gyttjig lera i Boden, se figur 4-3. Efter 17 år var korrosionshastigheten på alla djup <16 $\mu\text{m}/\text{år}$ på samma plats. Sannolikt försurades leran i samband med att pålarna drevs ner i jorden. En effekt som gav en initial korrosion men inte påverkade korrosion i ett längre perspektiv.

De båda resterande stängerna hade varit exponerade i 4-4. Solna. De aktuella provstängerna hade korroderat av på någon meters djup, se figur 4-4. Övriga provstänger indikerar låg korrosivitet. Troligen har de båda stängerna blivit utsatta för läckströmskorrosion eller annan yttre påverkan. Något som också påtalas av VTT (Törnqvist 2004).



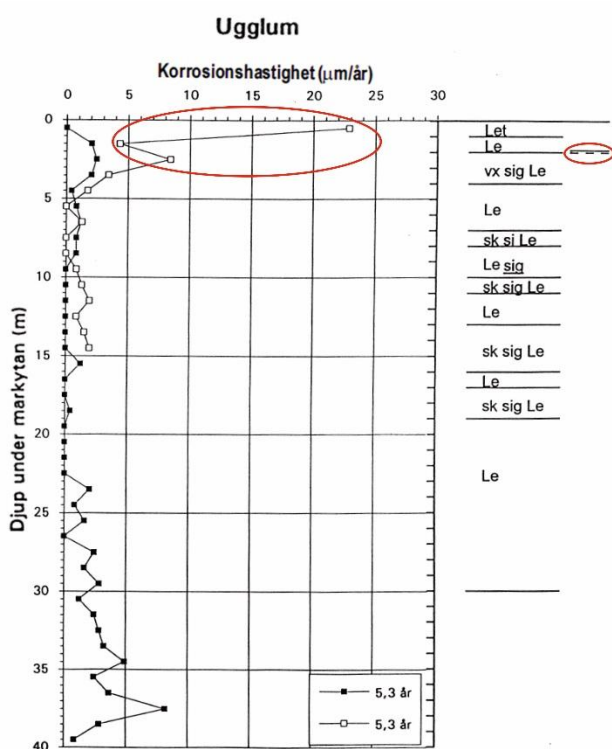
Figur 4-3. Försöksplats Boden (Bengtsson 2002).



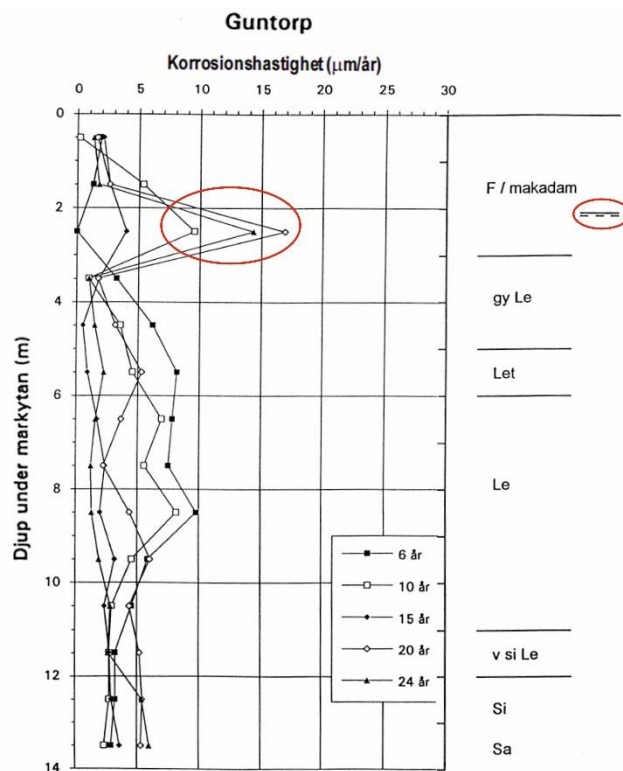
Figur 4-4. Försöksplats Solna (Bengtsson 2002).

Vår bedömning är att även Sandegrens resultat visar att korrosionshastigheten är låg under grundvattenytan. Några platser uppvisar istället indikationer på en luftningscell i grundvattenzonen, se figur 4-5 till 4-7.

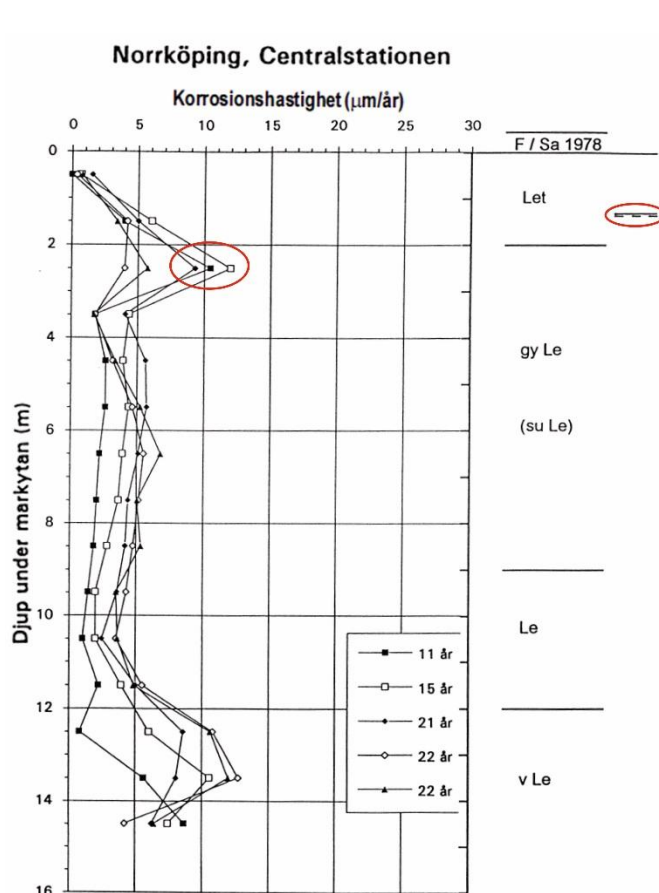
Intressant att notera är också att man inte registrerat någon förhöjd korrosion på en av provplatserna i Norrköping där ett lager slagg/kolaska fanns i de övre jordlagren (markerat i figur 4-8).



Figur 4-5. Försöksplats Ugglum (Bengtsson 2002).

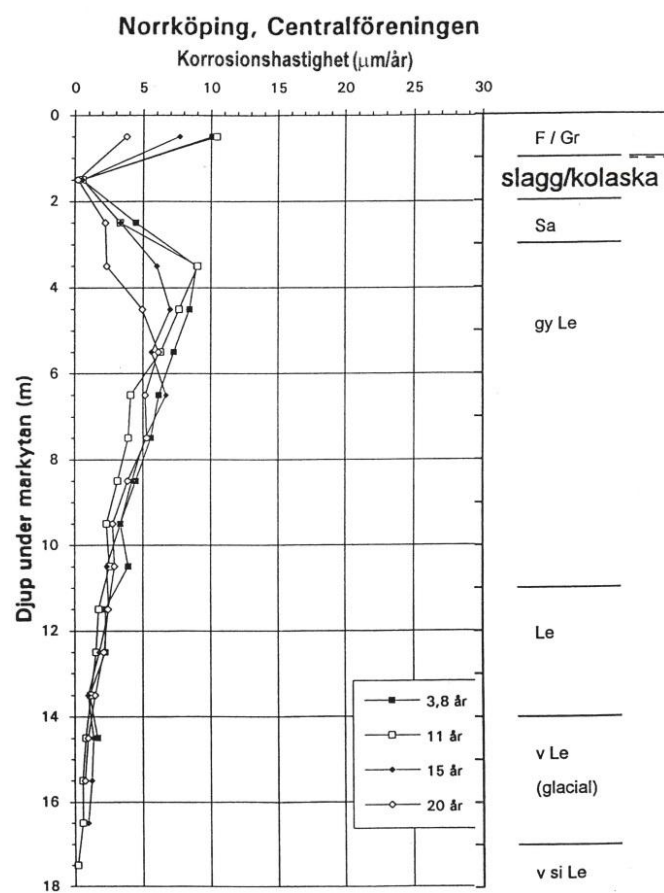


Figur 4-6. Försöksplats Guntorp (Bengtsson 2002).



Figur 4-7. Försöksplats Norrköping, Centralstationen (Bengtsson 2002).

Nuvarande markyta ligger ca 0,5 m över den ursprungliga.



Figur 4-8. Försöksplats Norrköping, Centralföreningen (Bengtsson 2002).

Den höga korrosiviteten som tillskrivits de sulfidrika lerorna utmed norrlandskusten (svartmockan) anses bero på att jorden försuras vid omrörning. Korrosiviteten avtar dock med tiden vilket visats dels av Sandegrens exponering i Boden men också Camitz provningar i Kramfors. Efter 5 år var korrosionshastigheten över grundvattenytan $12 \mu\text{m}/\text{år}$ och under grundvattenytan $6 \mu\text{m}/\text{år}$ för mindre provplåtar exponerade på olika nivåer. Det är snarare jordens låga resistivitet som gör att luftningscellen kring grundvattenytan skapar en zon med hög allmän korrosion strax under grundvattenytan.

En liknande genomlysning av SJ:s undersökning visade dessutom att den karakteristiska korrosionshastigheten inte varierar mellan olika jordarter (Camitz 2009). Med karakteristisk korrosionshastighet avses 95 %- fraktilen för alla observationer med en exponeringstid större än lika med 10 år, se tabell 4-2.

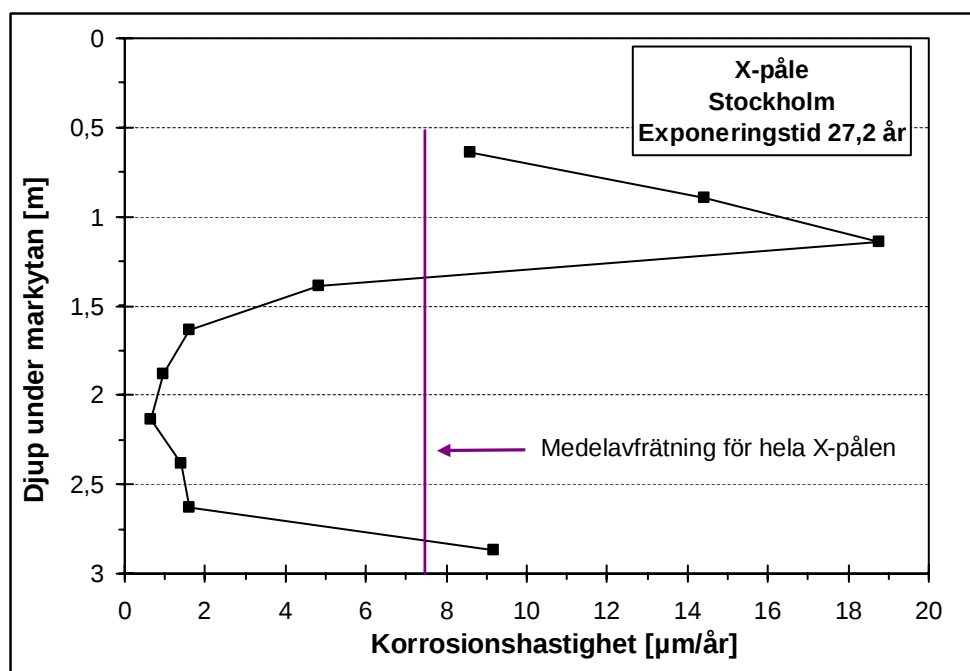
Tabell 4-2. Karakteristisk korrosionshastighet för fyra olika typjordar, exponeringstider större eller lika med 10 år (Camitz 2009).

Typ av jord	Karakteristisk korrosionshastighet, $\mu\text{m}/\text{år}$
Sandiga jordar	11,3
Leriga jordar	10,7
Jordar med organiskt material	12,1
Samtliga jordar	11,3

Vi kan således konstatera att från en nivå strax under grundvattenytan och längre ner är korrosionshastigheten i jord låg, $<10 \mu\text{m}/\text{år}$, vid långa exponeringstider. Detta gäller oberoende av jordart eller kemisk sammansättning. Orsaken är att syretillgången begränsar korrosionen. Under dessa anaeroba eller nära anaeroba förhållanden kan korrosionsprocessen istället stimuleras av mikrobiell korrosion. Närvaro av sulfatreducerande bakterier kan ofta påvisas i jorden men ingen för pålar allvarlig korrosion verkar uppstå, endast viss gropfrätning (Vinka 2001).

Laboratorieförsök har visat att den högsta korrosionshastigheten i aerob jord uppstår vid en vattenhalt av 7 %, vilket svarar mot en nivå ovanför grundvattenytan (Vinka 2007). Trots detta påträffas de kraftigaste angreppen i de flesta fall strax under grundvattenytan. Detta beror på att en luftningscell bildas i området kring grundvattenytan. Stålet under grundvattenytan offrar sig gentemot stålet ovanför grundvattenytan och eliminerar därmed den höga korrosionen som annars uppstått i den aeroba zonen (Vinka 2007).

Denna typ av lokalt förhöjd allmän korrosion uppstår inte i alla situationer då grundvattenytan befinner sig utmed pålens höjd. Om man har, med årstiderna, kraftigt varierande grundvattenyta kan man föreställa sig att zonen med koncentrerad korrosion sprids ut över en större del av pålens längd och därmed blir mindre markant. En mer distinkt grundvattenyta uppstår normalt i en friktionsjord (sand, morän). Trots detta är tendensen till lokalt hög korrosion mindre i dessa jordar. Det räcker således inte bara med närvaron av en luftningscell. Det faktum att denna lokala allmänna korrosion observerats i kloridrika kohesionsjordar indikerar att det förutom skillnader i vattenhalt också måste finnas en tillräckligt låg resistans i korrosionscellen. Ett mycket tydligt exempel visades i långtidsexponeringarna av pålar utförda vid Korrosionsinstitutet/Swerea KIMAB (Vinka 2011b). Vid intaget efter 27 år kapades pålarna upp i 0,25 m långa delar vilket möjliggjorde en utvärdering av den ”lokala jämna korrosionen” genom viktsförlustbestämning av varje del för sig. I den lågresistiva gyttjiga leran i Skå erhöles den profil som återges i figur 4.8.



Figur 4-8. Massförlustbestämd korrosionshastighet hos X-påle exponerad på Skå i Stockholm (Vinka 2011b).

Det förhöjda korrosionsvärdet på den nedersta påldelen är en så kallad ändeffekt, bland annat beroende på att stålet i spetsen är mer exponerat för syrediffusion.

4.4 Inverkan av jordresistivitet

Mot slutet av den sista istiden fördes stora mängder sediment med smältvattnet från de norska glaciärerna. Dessa sediment avsatte sig i havet. I och med landhöjningen är dessa områden nu de mest bebodda. Sedimenten utgörs av lera vars resistivitet varierar mellan 1 och 100 Ωm. Det lägre värdet motsvarar en kloridhalt i porvattnet på ca 30 g/l och det högre värdet en låg kloridhalt som ett resultat av att sötvatten lakat ur kloriderna.

Resistivitetens stora betydelse för den korrosionshastighet som uppstår i en luftningscell visas tydligt i norska undersökningar, utförda i marina leror (Tungesvik 1976 och Fischer 1981).

I de fall pålarna var helt belägna under grundvattenytan var korrosionshastigheterna låga, i god överensstämmelse med andra undersökningar. I något fall noterades en korrosionshastighet på 30 µm/år på den mest utsatta delen. Det ska dock beaktas att exponeringstiden i många fall var kort, 10 år och att pålarnas ursprungsdimensioner inte var kända vilket ökade osäkerheten i utvärderingen.

På en plats, Oslo Östra station, hade sonderingsstänger slagits ner redan 1938. Det speciella med denna plats var att stängerna passerade genom grundvattenytan. Salthalten i porvattnet varierade mellan 5 (överst) och 20 g/l (nederst). Maximala korrosionshastigheter på 100-300 µm/år noterades. (I ett fall även 500 µm/år men detta ansågs inte representativt). Detta visar dock att lokalt höga korrosionshastigheter kan uppstå strax under grundvattenytan om jorden samtidigt har en låg resistivitet.

Inom ramen för detta projekt kommer en laboratoriestudie genomföras där man studerar hur jordens resistivitet påverkar korrosionshastigheten i en luftningscell belägen vid grundvattenytan.

4.5 Inverkan av legeringstillsatser till stål

Undersökningar har visat att måttliga variationer av sammansättningen hos vanliga kolstål (olegerade stål) och låglegerade konstruktionsstål inte betyder något för korrosionshårdigheten i form av medelavfrätning i jord (Camitz 2009). I jord och vatten har så kallade rosttröga stål, det vill säga kolstål med inlegerade låga halter av krom, fosfor och koppar, inte bättre korrosionshårdighet än normala kolstål. Eftersom dessa stål fordrar god tillgång på luftsyre för sin "rosttröghet", kan de i stället ha sämre korrosionshårdighet än vanliga kolstål och låglegerade stål i syrefattiga miljöer, såsom vattenrik och tät jord.

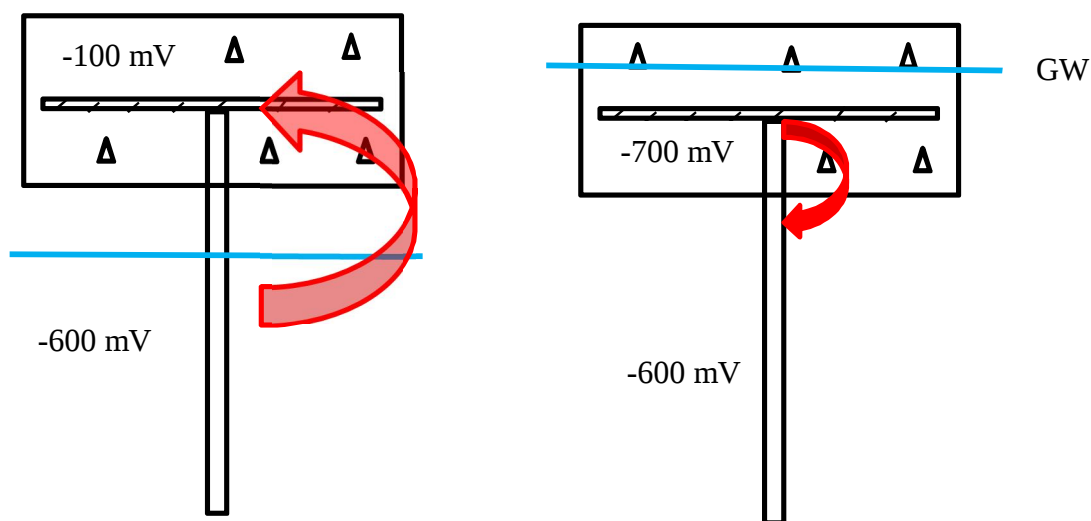
4.6 Inverkan av konstruktiv utformning

Den geometriska utbredningen hos en konstruktion påverkar risken för att utsättas för korrosion p.g.a. läckström eller lokala skillnader i korrosionsmiljön.

De flesta skador p.g.a. läckström är av resistiv natur d.v.s. de orsakas av elektriska fält i jorden. Om konstruktionen befinner sig i ett dylikt fält ökar risken för korrosion om konstruktionen har en stor utbredning. Detta kan gälla för spont eller för stålplåtar om dessa t.ex. är förbundna med varandra i ett ovanliggande betongdäck. Spont och plåtar utan ytbeläggning har dock en mycket stor yta som i de allra flesta fallen "jordar" ner i jorden befintliga elektriska fält varför risken normalt är mycket liten att läckströmskorrosion ska kunna ske.

Som påtalats i avsnitt 4.3 har konstruktionens läge i förhållande till grundvattenytan stor betydelse för om lokalt hög allmän korrosion ska uppstå eller ej. Är hela konstruktionen belägen under grundvattenytan blir korrosionshastigheten mycket låg. Passerar konstruktionen genom grundvattenytan uppstår en korrosionszon strax under grundvattenytan. Speciellt hög korrosionsrisk föreligger om konstruktionen går genom markbandet och grundvattenytan samtidigt ligger nära markytan.

En typ av galvanisk korrosion kan också uppstå om pålen/sponten delvis är ingjuten i betong och delvis exponeras för jord. I välluftad betong har stål en positivare (ädlare) potential än stål i jord. Det motsatta gäller för betong med hög vattenhalt där stålet får en negativare potential än motsvarande stål i jord. I det första fallet ökar korrosionen på stålet i jord och i det andra fallet minskar den eller påverkas endast marginellt, se figur 4-9. Den praktiska betydelsen av dessa galvaniska strömmar påverkas av betongens och jordens resistivitet och areaförhållanden mellan stål i betong och stål i jord, samt om betongen fungerar som en barriär för syretransporten ner i jorden eller ej, se avsnitt 6.4.



Figur 4-9. Galvaniska celler mellan stål i betong och stål i jord.

Stålrörspålar och segjärnspålar är inte helt täta. Grundvatten tränger så småningom in vid skarvhylsor och bergskor och pålen fylls efterhand helt eller delvis med grundvatten. Den invändiga stålytan kommer då att rosta. Tre zoner kan urskiljas där korrosionen blir olika stor: Ytorna över vattenytan rostar genom atmosfärisk korrosion, ytorna under vattnet rostar och dessutom rostar stålet i själva vattenytan genom så kallad vattenlinjekorrosion. Vattenlinjekorrosion medför djupare och mera koncentrerade angrepp än korrosionen på de övriga ytorna på pålens insida. Av denna anledning måste man ta hänsyn till den invändiga korrosionen i rörpålar, antingen genom tillämpning av en invändig rostmån eller genom att insidan korrosionsskyddas med t.ex. betongfyllning. Vilka invändiga korrosionshastigheter som bör ansättas skiljer sig kraftigt åt mellan olika dokument. I SS-EN 1993-5:2007 antas korrosionen vara försumbar, VTT föreslår att den sätts till 0,2 mm på 100 år. Pålkommisionen å sin sida ansätter 1 mm/100 år om grundvattnet är sött och 1,5 mm/100 år om grundvattnet är salt. Till detta återkommer vi i avsnitt 8.2.

5. Erfarenheter av korrosion på stålpålar och spont i vatten

En litteratursammanställning utfördes av Korrosionsinstitutet i början på 90-talet (Camitz 1994). 2004 reviderades EAU "Recommendations of the Committee for Waterfront Structures Harbours and Waterways" (EAU 2004). Eftersom de i SS-EN 1993-5:2007 angivna värdena på avrostning troligen bygger på rekommendationer givna i EAU 2004 så har även bakomliggande referenser studerats (bl.a. Hein 1990 och Alberts 1997). Ytterligare en litteratursammanställning gjordes i Storbritannien 2005 (Braekell 2005). Ett EU-projekt inriktat mot stålkonstruktioner i marin miljö avslutades 2007 (Houyoux 2007). Så sent som 2014 utfördes en svensk disputation inom området (Wall 2014). Som en del av arbetet studerades nyttillkommen litteratur. Det är främst dessa dokument som utgjort underlag för denna sammanställning.

Som ett komplement till litteratursökningen har också uppgifter från genomförda inspektioner i svenska hamnar insamlats. Detta har skett dels inom ramen för Walls arbete dels i samband med Task Force Group 1, Sundsvallsbron (Task 2012).

Som framgått av avsnitt 3.3.1 skiljer sig de korrosionszoner som uppstår på spont exponerad för tidvatten från de som uppstår på spont där vattenytans variationer i tiden är små. För Sveriges kuster och sjöar är tidvattenvariationerna små varför vi i det följande endast fokuserar på resultat från exponeringsplatser utan stora tidvattenvariationer.

5.1 Sötvatten

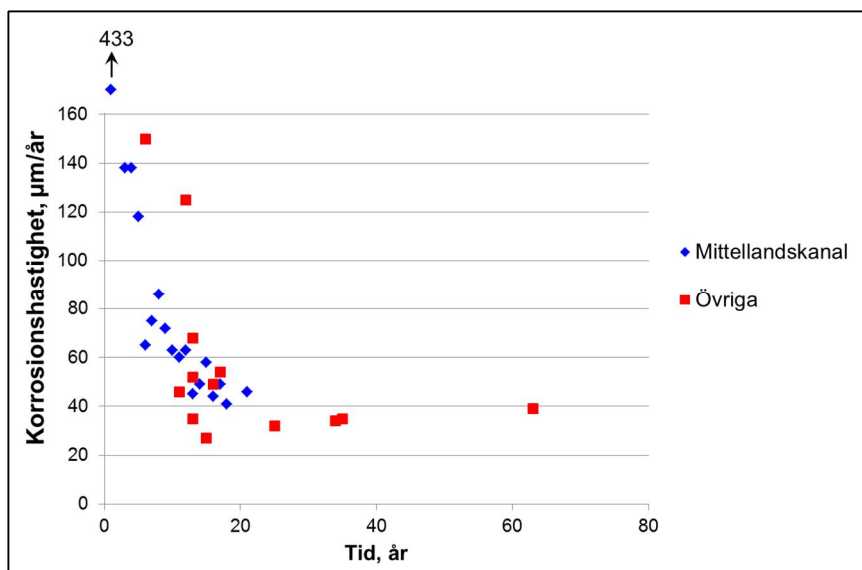
Ultraljudsundersökningar, från 1950- och 60-talet, utförda på spont exponerad för sötvatten i tyska hamnar, slussar m.m. gav de resultat som visas i tabell 5-1 (Girnau 1973). Sponternas ålder varierade mellan 20 och 50 år. Värdena anges som medelavfrätning i respektive zon.

Tabell 5-1. Medelavfrätningen i olika zoner på tyska spontkajer i nio sötvatteninstallationer (Girnau 1973).

Zon	Medelavfrätning, $\mu\text{m}/\text{år}$
Atmosfärszonen	10-50
Skvalpzonen	10-85
Undervattenszonen	10-32
Bottensediment	15

Trots tillgången på dessa resultat valde man tolv år senare att i sina rekommendationer ange att korrosionen i sötvatten kan sättas till 12 $\mu\text{m}/\text{år}$ (EAU 1985). Denna korrosionshastighet antogs gälla för hela spontens höjd från atmosfärsdel ner till bottensediment. Vidare antogs korrosionshastigheten vara konstant i tiden.

Under slutet av 80-talet sammanställdes resultaten från ett stort antal inspektioner i tyska sötvattenshamnar (Hein 1990). Dels studerades korrosionshastigheten som funktion av tiden på en och samma spont (Mittellandskanal), dels samlades resultat in från ett stort antal inspektioner utförda på sponter av varierande ålder. I samtliga fall fokuserade man på den mest korrosionsutsatta zonen kring vattenlinjen. Resultaten angavs som medelvärdet för maximal korrosion. Materialet har gått igenom och två mätvärden eliminerats då de inte ansetts representativa (slussar med varierande vattennivå). I figur 5-1 återges resultatet av denna analys.

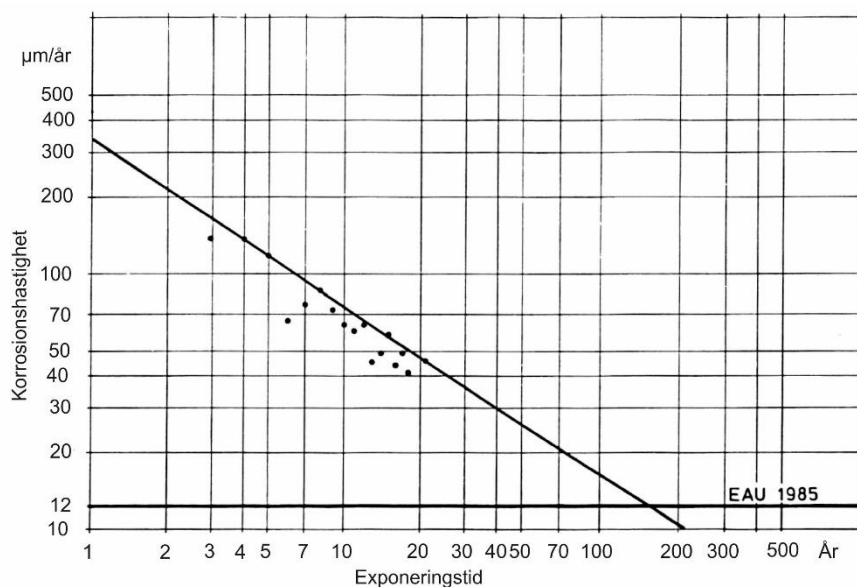


Figur 5-1. Medelvärde av den maximala korrosionshastigheten (korrosionen i vattenlinjen) som funktion av exponeringstiden i tyska sötvattenhamnar (data enligt Hein 1990).

Som framgår av figuren avtar den maximala korrosionshastigheten kraftigt med tiden under de första åren av exponering. Efter ca 20 år verkar dock hastigheten att stabilisera sig kring 30-40 $\mu\text{m}/\text{år}$. Troligen sker denna etablering av en konstant nivå redan efter 5-10 år. Den höga korrosionshastigheten under de första åren har en kraftig påverkan under många av de kommande åren.

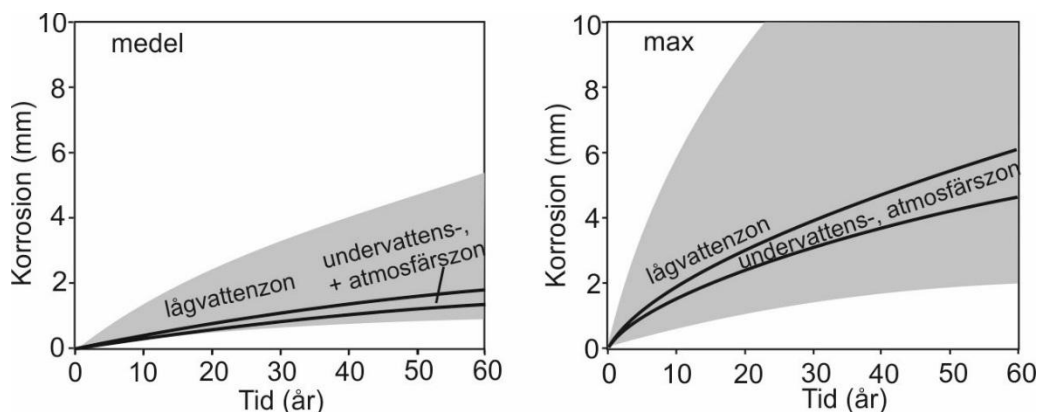
Hein har i sin rapport valt att göra en annan tolkning av resultaten, nämligen att det finns ett logaritmiskt samband mellan korrosionshastigheten och exponeringstiden, se figur 5-2.

Även med denna tolkning av resultaten skulle det ta 150 år innan den i EAU 1985 ansatta korrosionshastigheten på 12 $\mu\text{m}/\text{år}$ uppnås.



Figur 5-2. Logaritmiskt samband mellan maximal korrosionshastighet i sötvatten och exponeringstid enligt Hein (Hein 1990).

I EAU 2004 påtalas att korrosionshastigheten i olika zoner kan variera inom vida gränser och att detta beror på det stora antalet inverkanse faktorer. Förväntad avrostning i sötvatten åskådliggörs i figur 5-3. Vid beräkning av lastbärande kapacitet hos spanten ska dess tvärsnitt reduceras med medelavfrätningen i det vänstra diagrammet. Spanten bör designas så att det maximala böjmomentet inte sammanfaller med zonen för maximal korrosion (högra diagrammet).



Figur 5-3. Minskning av tjocklek p.g.a. korrosion i sötvatten (EAU 2004).

Nu påtalas också risken för att genomrostning i den mest utsatta zonen av spant kan leda till att bakomliggande massor spolats ut vilket dels medför dubbelsidig korrosion därefter, dels risk för sättningar. För att utvärdera tiden till dess att de första hålen uppstår ska det högra diagrammet i figur 5-3 användas.

För nya spantar föreslås att de dimensioneras utgående från kurvorna i diagrammen. Värden högre än de redovisade i kurvorna (grått fält) bör endast utnyttjas om lokala erfarenheter indikerar att så är nödvändigt. De grå fälten representerar spridningen i alla inspektionsresultat som ligger till underlag för figurerna.

De i figur 5-1 redovisade värdena svarar mot kurvan "lågvattnen" (vattenlinjen) i det vänstra diagrammet i figur 5-3, d.v.s. medelvärde av korrosionshastigheten i den mest utsatta zonen. Enligt figur 5-3 ligger den genomsnittliga korrosionshastigheten, efter 50 år, i den mest utsatta zonen på ca 30 $\mu\text{m}/\text{år}$ d.v.s. i god överensstämmelse med Heins resultat (30-40 $\mu\text{m}/\text{år}$). Något förvånande är den marginella skillnaden mellan avrostningen i vattenlinjen (kurvan "lågvattnen") och den i undervattenszonen och atmosfärszonen. Här ligger korrosionshastigheten på ca 20 $\mu\text{m}/\text{år}$ (exponeringstid 50 år).

Den maximala korrosionen d.v.s. korrosionshastigheten för de djupaste frätgroparna (det högra diagrammet i figur 5-3) ligger på 110 $\mu\text{m}/\text{år}$ vid en exponeringstid av 50 år. Även i detta fall är skillnaden mellan vattenlinjen och undervattenszonen förvånande liten, speciellt om man beaktar att gropfrätningen normalt är marginell i undervattenszonen, se avsnitt 3.3.1.

Antalet undersökningar i svenska sötvatten är begränsade. Eriksson m.fl. utförde inspektioner i bl.a. Stockholms hamnar (Eriksson 1985). I Mälarens sötvatten uppmättes den maximala korrosionen, i vattenlinjen, till $150 \pm 50 \mu\text{m}/\text{år}$. Mätningen sades inkludera frätgropar men det är oklart om resultaten kan jämnställas med de maximala "max" i figur 5-3. I undervattenszonen uppmättes korrosionshastigheten till $50 \mu\text{m}/\text{år}$. Några uppgifter om kajernas ålder finns inte. Dessa värden är högre än de rapporterade från Tyskland. Detta kan bero på att det statistiska underlaget är sämre i den svenska undersökningen och/eller att kajernas ålder är lägre. Det kan dock inte uteslutas att korrosionshastigheten genomgående är högre i svenska sötvatten. Vad som skulle tala för detta är att svenska vatten är mjukare än tyska (mindre tendens till uppbyggnad av skyddande skikt av kalk och korrosionsprodukter) och att isnötning tar bort skyddande skikt i vattenlinjen (temperaturen har en neutral inverkan, se avsnitt 3.3.1).

En undersökning av korrosiviteten i olika svenska sjöar och floder visade dock att medelavfrätningen, för helt nedsänkta prov, efter 4 år varierade mellan 20 och $60 \mu\text{m}/\text{år}$ (Johnsson 1990). De förhållandevis korta exponeringstiderna indikerar att skillnaderna mellan tyska och svenska vatten ändå kanske inte är så stora. Detta skulle i sin tur tala för att andra faktorer som propellerrörelser och isnötning ger upphov till att man rapporterat högre korrosionshastigheter i svenska sötvattenhamnar.

5.2 Havsvatten och bräckt vatten

Många undersökningar av korrosionstillståndet hos spont exponerad för havsvatten finns att tillgå. En sammanställning av uppgifter rörande medelavfrätningen inom de olika korrosionszonerna återfinns i tabell 5-2.

Tabell 5-2. Sammanställning av korrosionsdata för spont i havsvatten.

Zon	Medelavfrätning, $\mu\text{m}/\text{år}$				
	Ciria ¹⁾	Japan ²⁾	Tyskland ³⁾	Uhlig ⁴⁾	Nederländerna ⁵⁾
Atmosfärzon	20-40		35-100	⁷⁾	50-70
Skvalpzon	80-420	100-270	70-250	112-363	120-270
Tidvattenzon	40-100			44-137	
Lågvattenzon	80-200 ⁶⁾	50-110		⁷⁾	
Undervattenzon	40-130	40-130	40-100	39-143	25-90
I bottensediment	30-80	20	10-20	33-103	15

1) Sammanställning av litteraturdata i brittisk och amerikansk litteratur t.o.m. 2005 (Braekell 2005).

2) Japansk handbok från Japanese Association for Steel Pipe Piles (Camitz 1994).

3) Tyska Nordsjöhamnar (Girnau 1973).

4) Sammanställning av internationell litteraturdata (Uhlig 2011)).

5) Nordsjöhamnar som i vissa fall ligger vid flodutlopp (skiktat vatten) (Wijngaard 1982)

6) Vid ALWC betydligt högre värden.

7) Endast ett värde vilket tyder på litet underlag (utelämnas).

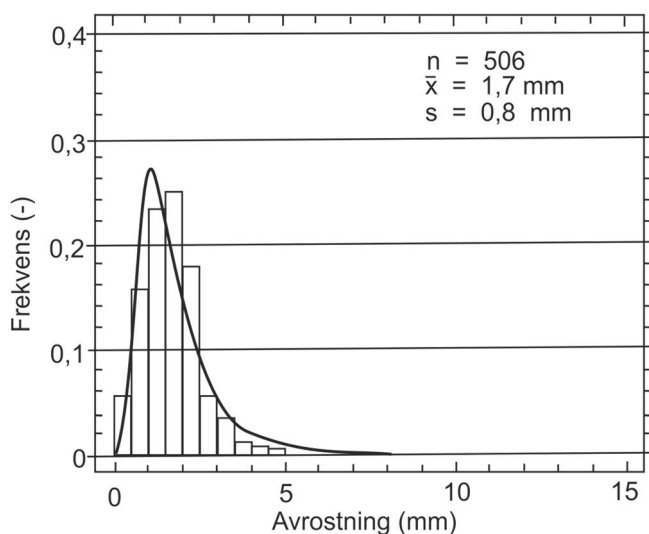
Speciellt stor spridning noteras i de mest utsatta zonerna, nämligen skvalpzonen/vattenlinjen och lågvattenzonen/lägsta tidvatten. Detta återspeglar det faktum att det är i just dessa zoner som korrosionen karaktäriseras av en kombination av allmän korrosion och gropfrätning. I kombination med alla andra inverkanse faktorer (vattnets kemiska sammansättning, dess temperatur och rörelse samt exponeringstiden) ger detta en extra spridning av mätresultaten.

I ett nyligen avslutat EU-projekt utfördes en omfattande genomgång av litteratur och inspektionsresultat från 18 olika europeiska länder (totalt 60 referenser). Konstruktionerna utgjordes av stålspont med en ålder mellan 5 och 52 år. De 18 mest vederhäftiga dokumenten behandlades statistiskt och medelvärden för den jämna korrosionen togs fram, se tabell 5-3.

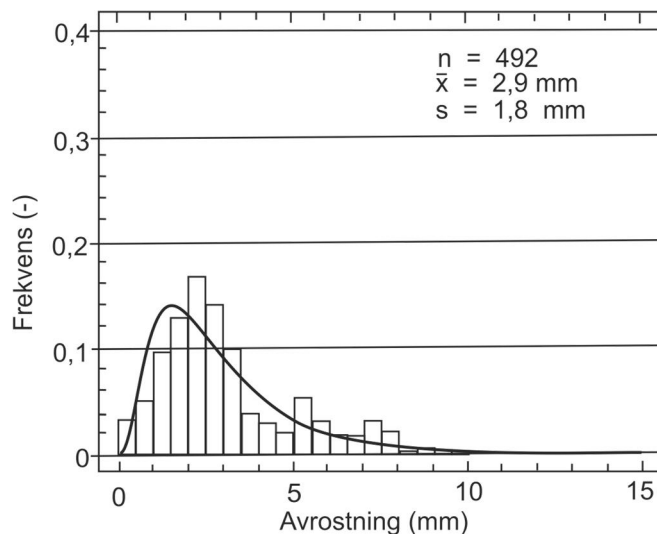
Tabell 5-3. Medelvärdet, baserat på 60 referenser, för den jämna korrosionshastigheten i de olika zonerna (Houyoux 2007).

Zon	Allmän korrosion, $\mu\text{m}/\text{år}$	Anmärkning
Skvalpzon	107	
Tidvattenzon	40	
Lågvattenzon	95	Högre om ALWC
Undervattenzon	56	
I bottensediment	22	

Den stora spridningen i tabell 5-2 skulle således förklaras av inverkan från lokala frätgropar på den uppmätta allmänna korrosionen (och variationer i exponeringstid). Detta har också tydligt påvisats av Alberts (Alberts 1997). Genom att genomföra ett stort antal tjockleksmätningar i olika zoner på en och samma 54 år gammal spont kunde han påvisa tydliga skillnader mellan den statistiska fördelningen i undervattenszonen (dominerande allmän korrosion) och i lågvattenzonen (allmän och gropfrätning), se figur 5-4 och 5-5.



Figur 5-4. Fördelningskurva för avrostning i undervattenszonen på en 54 år gammal spont (Alberts 1997).



Figur 5-5. Fördelningskurva för avrostning i vattenlinjen på en 54 år gammal spont (Alberts 1997).

Som framgår av figurerna varierade uppmätta korrosionshastigheter i undervattenszonen mellan 0 och 90 $\mu\text{m}/\text{år}$ och mellan 0 och 180 $\mu\text{m}/\text{år}$ i vattenlinjen. Medelvärdet för de båda zonerna var dock 31 respektive 54 $\mu\text{m}/\text{år}$.

Risken med att ange den allmänna korrosionshastigheten utan att ta hänsyn till hur den lokala korrosionen inverkar på uppmätta värden åskådliggörs av en brittisk undersökning, se tabell 5-4.

Tabell 5-4. Korrosionshastigheter uppmätta i brittiska hamnar (Camitz 1993).

Zon	Korrosionshastighet, $\mu\text{m}/\text{år}$	
	Medelvärde	Största värde i 95% av mätningarna
Skvalpzonen	90	180
Tidvattenzonen	40	110
Lågvattenzonen	90	410
Undervattenzonen	50	140
I bottensedimenten	20	50

Överensstämmelsen mellan tabell 5-3 och 5-4 är mycket god vid en jämförelse mellan allmän korrosion i tabell 5-3 och medelvärden redovisade i tabell 5-4.

Enligt avsnitt 3.3.1. har laboratorieundersökningar visat att korrosionshastigheten inte förändras med saliniteten i intervallet 1-3 ‰. Detta gäller således för stål helt nedsänkt i vatten d.v.s. i undervattenzonen. Hur salthalten, inom samma intervall, inverkar på den maximala korrosionen i vattenlinjen undersöktes i danska hamnar på 60-talet (Havnekorrosionsudvalget 1963). Undersökta hamnar återges i figur 5-6. Resultatet för hamnar i bräckt Östersjövatten (0,8-1,0 ‰) återfinns i tabell 5-5 och resultaten för hamnar i havsvatten i tabell 5-6. Som framgår av tabellerna registrerades likvärdiga maximala korrosionshastigheter i bräckt och salt vatten.



Figur 5-6. Inspekterade danska hamnar (Havnekorrosionsudvalget 1963).

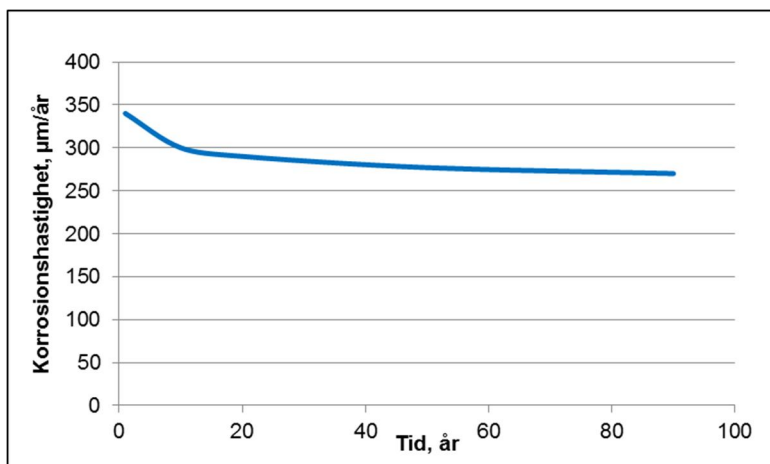
Tabell 5-5. Minsta och största medelavfrätning i den mest utsatta zonen strax under medelvat-
tenlinjen i danska Östersjöhamnar.

Nummer	Hamn	Medelavfrätning, $\mu\text{m}/\text{år}$
1	Augustenborg	110-200
3	Fredricia	180-700
4	Gedser	200-250
5	Kolding	160-220
6	Middelfart	140-220
7	Köpenhamn	150-290
9	Masnedsundsbroen	-350
10	Middelfart	250-280
12	Nyköping	150-300
15	Skovshoved	120-400
17	Thyborön	120-280
Medelvärde (nr 3 exkluderad)		140-255

Tabell 5-6. Minsta och största medelavfrätning i den mest utsatta zonen strax under medelvat-
tenlinjen i danska Nordsjöhamnar.

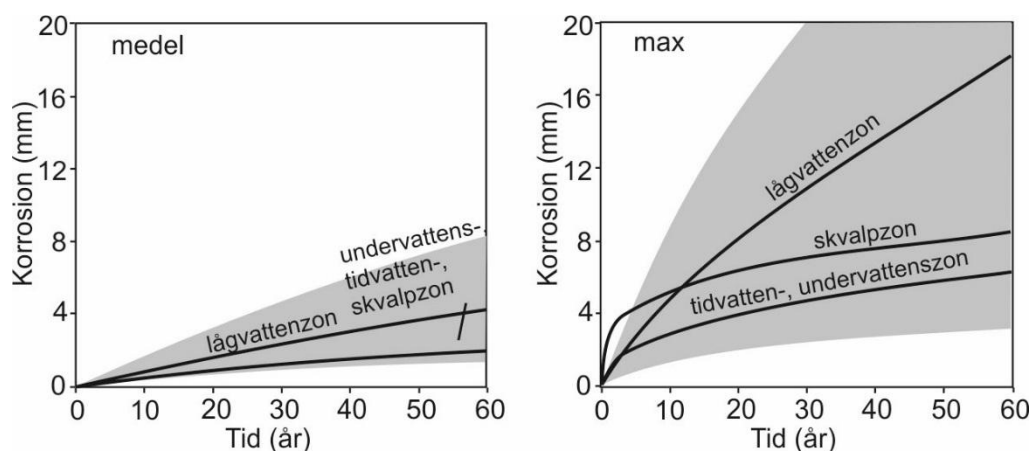
Nummer	Hamn	Medelavfrätning, $\mu\text{m}/\text{år}$
2	Esbjerg	90-300
8	Lemvig	110-300
11	Nordby, Fanö	-200
13	Oddesundsbroen	-500
14	Rördal	150-200
16	Thyborön	150-220
Medelvärde		125-286

De danska erfarenheterna att den maximala korrosionen i vattenlinjen är av samma storleksordning i Nordsjön och i södra Östersjön verifieras av tyska undersökningar. Av Hein redovisade resultat återges grafiskt i figur 5-7.



Figur 5-7. Den maximala korrosionshastigheten utveckling i tiden för spont i Nordsjön och Östersjön (efter Hein 1990).

Heins resultat refereras i EAU 2004 där diagrammen i figur 5-8 återfinns. Diagrammen gäller för både Nordsjön och Östersjön. Figur 5-7 indikerar en genomsnittlig maximal korrosionshastighet på 275 µm/år under 50 år. Detta svarar mot en ackumulerad avfrätning på 13,75 mm vilket stämmer ganska väl med figur 5-8.



Figur 5-8. Tjockleksminskning p.g.a. korrosion i havsvatten, både Nordsjön och södra Östersjön (EAU 2004)

I det vänstra diagrammet redovisas tjockleksminskningar som rekommenderas då spontens lastbärande kapacitet ska beräknas. Detta svarar sannolikt mot bedömd jämn korrosion. Av diagrammet kan vi utläsa att efter 50 år är tjockleksminskningen 1,8 mm i undervattenszonen och 4,0 mm i lågvattenszonen. Detta svarar mot korrosionshastigheterna 80 respektive 35 µm/år. Detta är i god överensstämmelse med värden redovisade i tabell 5-3.

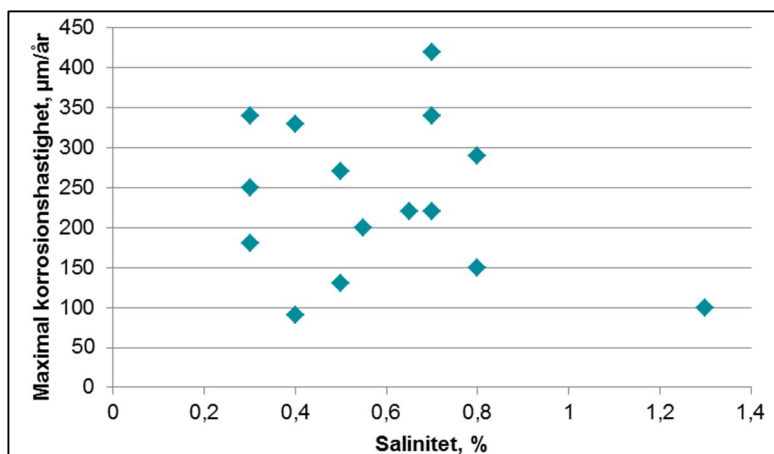
Nästa fråga är om korrosionshastigheterna förändras ju längre norrut vi kommer i Östersjön och vidare upp i Bottenhavet och Bottenviken. I tabell 5-7 har tillgängliga data sammanställts. Av denna kan vi se att den jämna korrosionen i undervattenszonen inte verkar variera med salthalten och att medelvärdet snarare ligger på 50 µm/år än de i EAU föreslagna 35 µm/år. Vi har således inga bevis för att korrosionshastigheten i undervattenszonen är lägre i Bottenhavet än i Östersjön.

Tabell 5-7. Korrosionsdata från Östersjön, Bottenhavet och Bottenviken (Eriksson 1985, Wall 2011, Task 2012, Vinka 2014).

Hamn	Ungefärlig* salthalt, %	Maximal avfrätning (vattenlinjen), µm/år	Korrosionshastighet i undervattenszon, µm/år	Referens
Härnösand	0,4	330		Eriksson
Härnösand	0,4	90	60	Vinka
Norrsundet	0,5	270		Eriksson
Skutskär	0,3	180		Eriksson
Gävle	0,5	130	40-80	Vinka
Norrtälje	0,55	200		Eriksson
Stockholm-Saltsjön	0,3	340		Eriksson
Stockholm-Saltsjön	0,3	250	20-60	Task
Västervik	0,65	220	80-90	Wall
Kalmar	0,7	220	40-70	Wall
Åhus	0,7		<100	Task
Karlskrona	0,7	340		Eriksson
Karlshamn	0,7	420		Eriksson
Malmö	0,8	290		Eriksson
Malmö	0,8	150	10-90	Wall
Ängelholm	1,3	100	10-50	Wall

*Bedömning har gjorts av hur stor inverkan som utlopp från närliggande älv har på salthalten.

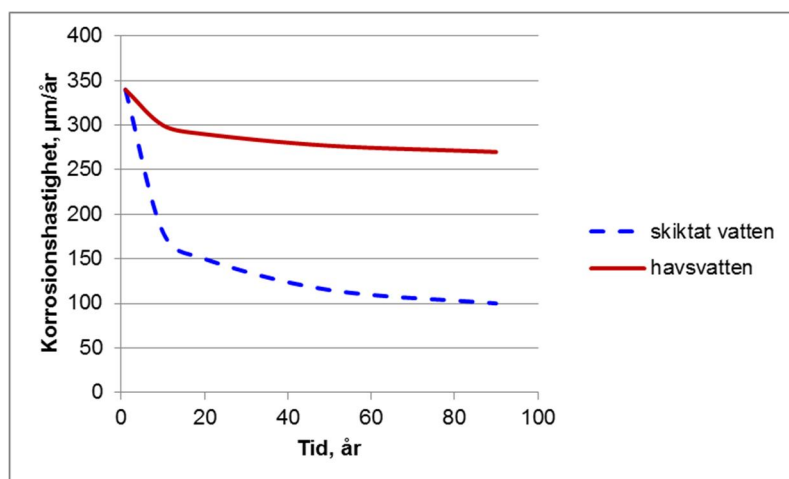
De i tabell 5-7 angivna värdena för maximal korrosion återges grafiskt i figur 5-9. Något samband mellan salinitet och maximal korrosionshastighet kan inte uttolkas. Vidare verkar de rapporterade värdena vara av samma storleksordning som de i södra Östersjön och Nordsjön.



Figur 5-9. Uppmätta maximala korrosionshastigheter i Östersjön och Bottenhavet (data enligt tabell 5-7).

5.3 Skiktat vatten

Ofta ligger städer (hamnar, broar) nära flodutlopp. Här skiktas sig ofta vattnet. Det söta flodvattnet lägger sig ovanpå det saltare havsvattnet. Beroende på flödet i floden och vindriktning kan förhållandena variera från tidpunkt till tidpunkt. Inspektioner i kustnära tyska och nederländska Nordsjöhamnar belägna vid flodutlopp har visat att den maximala korrosion blir avsevärt lägre än i hamnar som inte ligger vid ett flodutlopp, se figur 5-10 (Hein 1990). I litteraturen har man kallat dessa vatten bräckta men det borde vara mer korrekt att kalla de för skiktade. Vi har ju konstaterat att korrosionen är lika hög i det bräckta Östersjövatten som i rent havsvatten. Den lägre korrosionshastigheten vid flodutlopp beror därför snarare på långa perioder med sött ytvatten.



Figur 5-10. Maximal korrosionshastighet i skiktat vatten och i havsvatten (Hein 1990).

5.4 Inverkan av legeringstillsatser till stål

Så kallade rosttröga stål, stål med bl.a. en låg halt koppar, och låglegerade höghållfasta stål har ansetts ha högre korrosionsbeständighet i atmosfärs- och skvalpzonen. En undersökning utförd av TNO i Nederländerna visar dock att de kopparlegerade rosttröga stålen inte har lägre korrosionshastighet än vanliga kolstål i havsvatten (Winjgaard 1982).

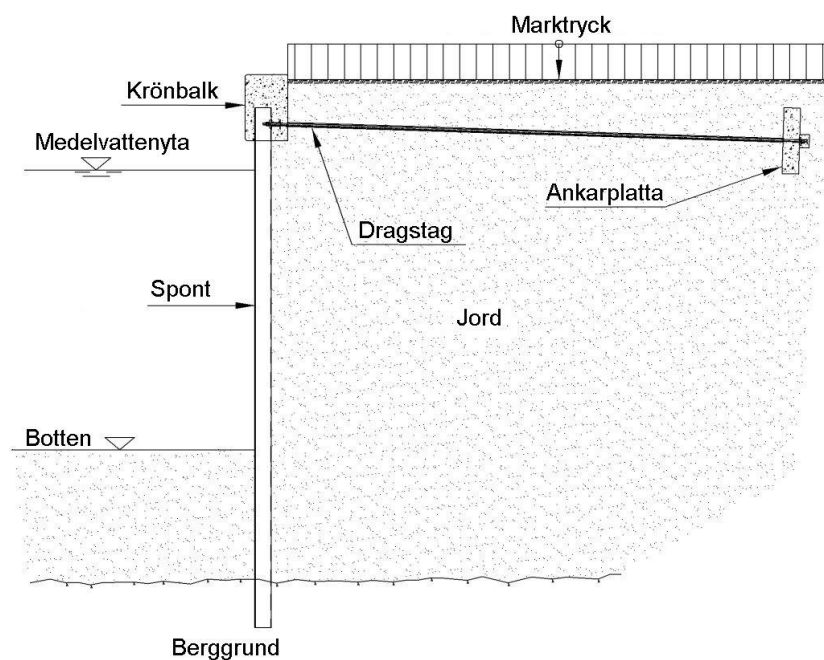
I EAU 2004 slår man fast att tillsats av koppar inte förbättrar ett ståls korrosionshårdighet i undervattenszonen. Däremot anser man att koppar tillsammans med nickel och krom samt fosfor och kisel ökar stålets hårdighet i och ovanför skvalpzonen. Detta påstås gälla speciellt i tropiska regioner med höga koncentrationer salt i luften. Vidare påtalar man att några skillnader i korrosionshårdighet inte föreligger mellan stål inkluderade i SS-EN 10248 och SS-EN 10025 (konstruktionsstål) samt i SS-EN 10028 och SS-EN 10113 (höghållfastare finkorniga konstruktionsstål).

Om glödskalet inte har tagits bort innan sponten slås så kommer accelererad korrosion att uppstå i punkter där glödskalet är skadat (Uhlig 2011). Detta är en form av galvanisk korrosion mellan det ädlare glödskalet och det oädlare stålet och resulterar i gropfrätning. Korrosionen avtar med tiden dels p.g.a. att isolerande kalkbeläggningar byggs upp på glödskalet dels att glödskalet successivt spjälkas av (korrosionsprodukter på stålet underminerar glödskalet).

5.5 Inverkan av konstruktiv utformning

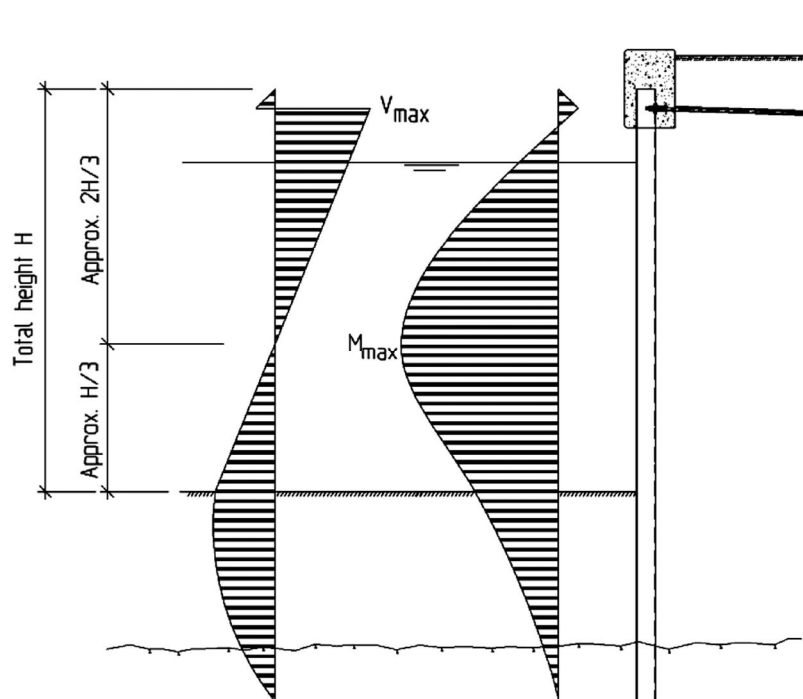
Då man konstruerar en spontvägg är det viktigt att zonen med maximal korrosion d.v.s. vattenlinjen, inte sammanfaller med den del av sponten som är utsatt för de största böj-påkänningarna.

Den vanligaste kajkonstruktionen i Sverige är en bakförankrad spont, se figur 5-11.



Figur 5-11. Bakförankrad spontvägg (Wall 2011).

Den mest belastade delen av sponten ligger på en $1/3$ av höjden från botten där böjmomentet är som störst, se figur 5-12. De största skjuvkrafterna uppstår dock på den nivå där infästningarna befinner sig. Om sponten ska fungera som stöd för vertikala laster måste dock hänsyn tas till eventuella angrepp över hela spontens yta.



Figur 5-12. Böjmoment (M) och skjuvkrafter (V) för en bakförankrad spontvägg (Wall 2011).

Om sponten slutar under vattenlinjen kan hänsyn till korrosionen tas genom dimensionering med rostmån. Passerar dock sponten genom vattenlinjen måste hänsyn tas till de höga korrosionshastigheterna, dessutom med inslag av gropfrätning, som uppstår i vattenlinjen. Förr eller senare kommer sponten att perforeras. Då detta sker kommer bakomliggande massor att spolask ur. Korrosionen övergår nu till att bli dubbelsidig från att tidigare ha varit nära nog ensidig. Korrosionen på jordsidan anges av vissa som försumbar (Wijngaard 1982) och har av andra uppskattats till ca 10% av korrosionen på vattensidan (Eriksson 1985).

För att förhindra att sponten perforeras kan krönbalken gjutas ner, se avsnitt 6.4, eller så måste någon annan åtgärd vidtas, se kapitel 6.

5.6 Inverkan av driftförhållanden

I kommersiella hamnar påverkas spont och pålars beständighet av sjötrafiken. Således har propellerrörelser i många fall en eroderande effekt i undervattenszonen. Vidare uppstår mer isnötning då fartyg pressar is mot sponten.

6. Åtgärder mot korrosion

Stålpålar och stålspons i jord och vatten kan antingen dimensioneras med hänsyn till bedömd avrostning under den dimensionerande livslängden (rostmån) eller förses med korrosionsskydd. De båda metoderna kan också kombineras. I detta kapitel redovisas vilka korrosionsskyddande åtgärder som kan vidtas. Reparationsmetoder behandlas inte.

6.1 Rostmån

I standarder och dimensioneringsanvisningar anges ”dimensionerande rostmån” för olika jord- och vattenförhållanden. Dimensionerande rostmån för 100 års livslängd har valts utifrån extrapolerade uppmätta värden på korrosionen (”karaktäristiska värden”) vid olika jord- och vattenförhållanden, som ökas med en bedömd ”partialkoefficient” för att ta hänsyn till osäkerheten i bestämningen av korrosionshastigheten. För rörpålar, som inte korrosionsskyddas invändigt gäller också att man invändigt skall ta hänsyn till en viss rostmån.

Dimensioneringen ska ske med hänsyn till den mest korrosionsutsatta delen av konstruktionen.

6.2 Organiska beläggningar

På slanka stålrörspålar är en organisk beläggning i form av en utvändig plastmantel vanligt förekommande. Plastmanteln utgörs av ett flera millimeter tjockt skikt av polyeten (PE) eller polypropen (PP) med ett underliggande tunt epoxiskikt. Grövre rörpålar med plastmantel förekommer framför allt i vatten, men enstaka svenska projekt med pålning i jord har även utförts med grova stålrörspålar belagda med plastmantel (Camitz 2009).

Massiva pålar kan, av tekniska skäl, inte beläggas med PE- eller PP-beläggning. På sådana pålar är så kallad tung rostskyddsmålning mer lämpad. Denna form av rostskyddsmålning utförs med antingen tvåkomponenters epoxifärg (EP) eller tvåkomponenters polyuretanfärg (PUR). Färdigt färgskikt är 0,3 – 0,5 mm tjockt. Massiva stålpålar med rostskyddsmålning förekommer emellertid sällan i jord. Skälet är osäkerhet rörande skyddseffektiviteten och att denna typ av skyddsbeläggning är dyr.

Även spons kan rostskyddsmålas. Ett korrekt applicerat målningssystem kan skjuta upp ”korrosionsstarten” på en sponts undervattenszon med upp till 20 år. Detta förutsätter dock att ytan blåstras till Sa 2 1/2 och att ett lämpligt målningssystem väljs, rekommendationer ges i EN ISO 12944.

Om målningen sker före slagning måste man räkna med att skador uppstår, speciellt vid låsen. Antingen utförs reparationsmålning efter målning (skyddsamm krävs) eller kombineras metoden med katodiskt skydd. Det katodiska skyddet behöver då bara åstadkomma skydd på ytor där målningen skadats.

Vid slagning av pålar i jord skadas de organiska beläggningarna. Skadorna är dock endast fläckvis i form av mer eller mindre långa repor utmed pålen (Bergdahl 2005). Vilken praktisk betydelse får dessa skador i skyddsbeläggningen? Som påtalats tidigare kan en lokalt hög korrosionshastighet i vissa fall uppstå strax under grundvattenlinjen. Denna kan vara så hög att den inte kan kompenseras med rostmån. Angreppet beror på en luftningscell där syrereduktionen i den luftade zonen ovanför grundvattenlinjen bestämmer korrosionshastigheten. Om 90 % av ytan i den luftade zonen är ytbelagd sjunker därmed den maximala korrosionen med en faktor 10. Det är således tillståndet hos beläggningen i den luftade zonen som bestämmer hur allvarlig korrosionen blir i den mest utsatta delen strax under grundvattenlinjen. Även en skadad beläggning medför därför en kraftig reduktion av korrosionshastigheten i den mest utsatta delen.

På spont i vatten sker den kraftigaste korrosionen i vattenlinjen. Det är också denna del av spontanen som är mest exponerad för isnötning vintertid. Enbart målning som korrosionsskydd av spont som går genom vattenlinjen känns tveksamt, i svenskt klimat. I kombination med katodiskt skydd kan dock en avsevärd nedsättning av korrosionshastigheten påräknas. Målningen medför att antalet erforderliga anoder blir mycket mindre.

6.3 Oorganiska beläggningar

Vid varmförzinkning erhålls normalt beläggningstjocklekar på 60-80 μm . I vissa kiseltätade stål kan beläggningar på upp till 300 μm åstadkommas. Risken för flagning ökar dock för dessa tjockare beläggningar, speciellt för pålar och spont som slås ner i jorden.

Korrosionshastigheten i jord varierar mellan ca 5 och 30 $\mu\text{m}/\text{år}$ (Slunder 1983), 1-25 μm per år som genomsnittlig avfrätning i fortvarighetstillstånd i svenska jordar (Mattsson 2009), och kan sättas till 20 $\mu\text{m}/\text{år}$ i vatten, högre i floder och vid tidvatten, (Slunder 1983) varför zink endast ger ett temporärt skydd under de första åren för pålar och spont.

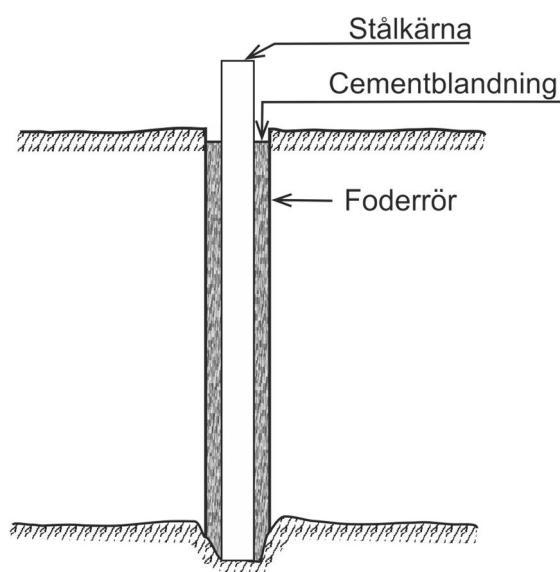
Inom offshore är metallsprutning en ofta använd metod. För vattenberörda ytor används aluminium som ofta tätas med en sealer. Även ett yttre färglager appliceras ofta (topcoat). Aluminium har en låg korrosionshastighet i havsvatten. En svaghet är vidhäftningen mellan det sprutade aluminiumskiktet och stålet. Om nötning från t.ex. is kan befarias är risken stor för att beläggningen skadas. Vidare går det inte att bara belägga en del av en vattenberörd yta. Om så sker kommer beläggningen snabbt att förbrukas genom galvanisk korrosion mot övriga obelagda stålytor.

6.4 Ingjutning i injekteringsbruk/nedgjuten krönbalk

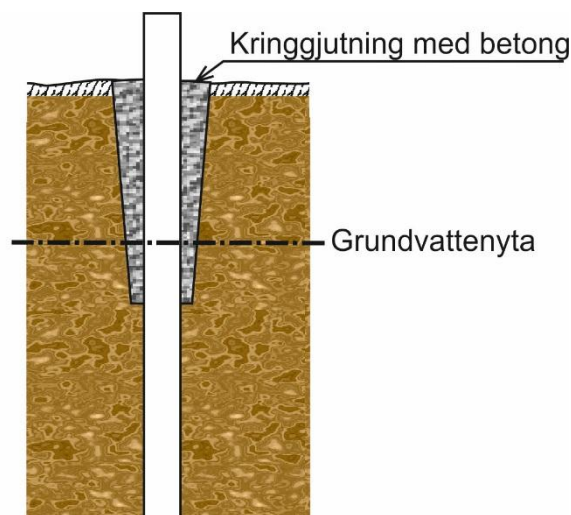
I jord förekommer det att vissa påltyper skyddas mot korrosion genom ingjutning i injekteringsbruk. Vi kan särskilja på:

- borrade stål kärnepålar i foderrör
- kringgjutning efter prylning
- mantelinjekterade stålrörspålar.

Vid installation av borrade stål kärnepålar borrar ett foderrör ner i jorden samtidigt som jorden i röret sugas ur. Stålpålen trycks därefter ner i röret och utrymmet mellan påle och foderrör injekteras med bruk, se figur 6-1. En normalt slagen påle kan kringgjutas med betong om en prylning utförs efter slagningen, se figur 6-2. Denna form av lokalt korrosionsskydd förekommer dock sällan.



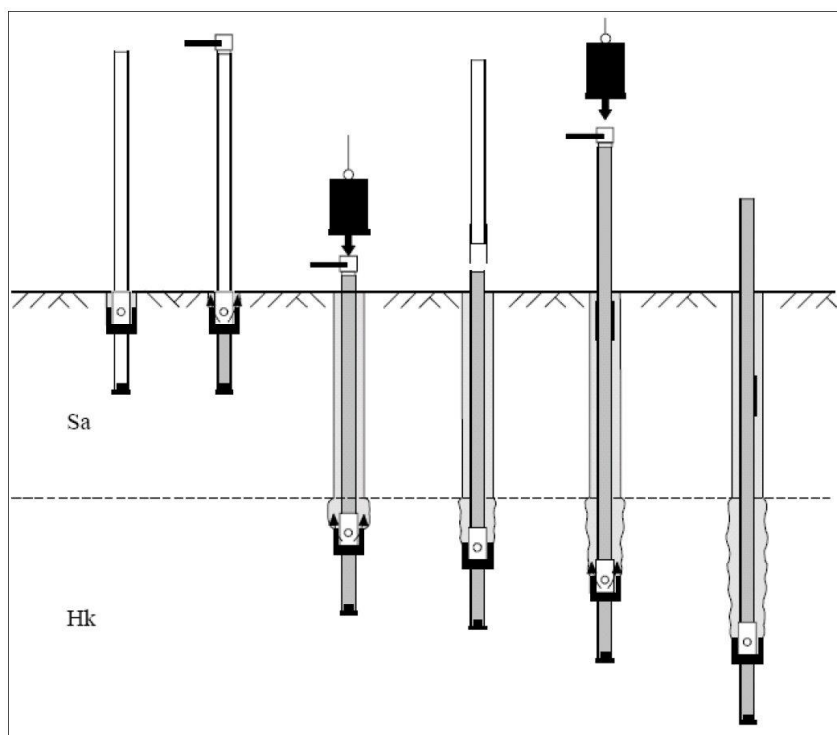
Figur 6-1. Injekterad stål kärnepåle i foderrör.



Figur 6-2. Kringgjutning med betong efter prylning.

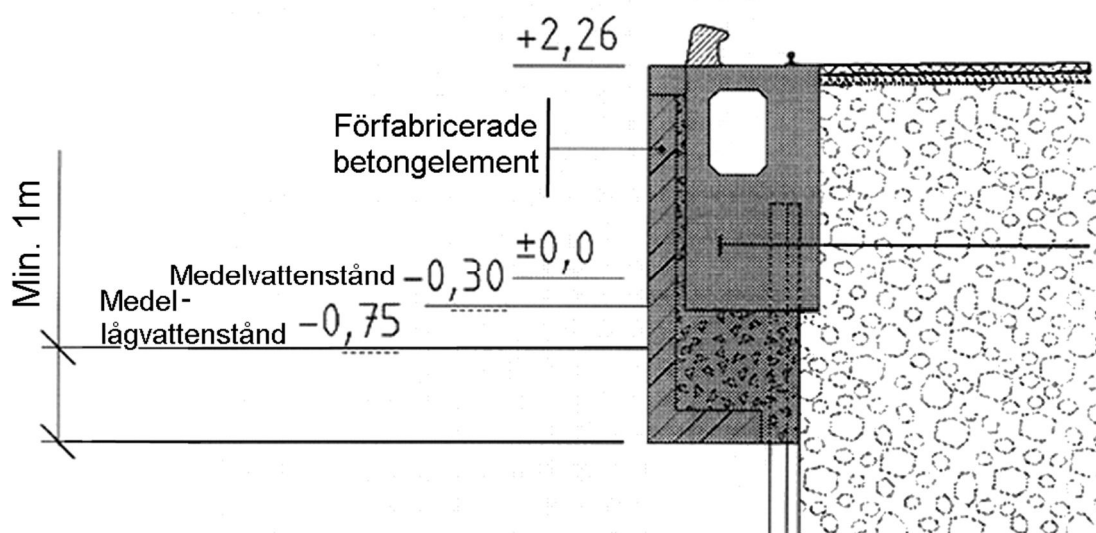
Inga skadliga galvaniska korrosionseffekter har observerats på det nakna stålet strax under en betongingjutning (Ohsaki 1982). I denna japanska undersökning utfördes kringgjutningen endast ner till 0,4 m under markytan. Grundvattenytan låg på -4m. Enligt figur 4-9 i kapitel 4.5 bör en risk för galvanisk korrosion föreligga i detta fall. Ohsaki uppmätte inledningsvis förhållandevis stora potentialskillnader i horisontell led vilket skulle indikera risk för galvanisk korrosion. Vid uppdragandet av pålarna, efter 10 år, visade det sig dock att potentialskillnaderna hade försvunnit. Korrosionshastigheten var till och med lägre för pålarna som varit ingjutna. Detta förklarade Ohsaki med att betongen reducerat syretillförseln till den övre luftade zonen och att denna effekt varit starkare än den galvaniska.

Mantelinjektering används primärt för att förbättra pålens geotekniska bärförmåga men ger också ett korrosionsskydd, se figur 6-3. Ruukki rekommenderar att mantelöppnarens diameter är minst 40 mm större än pålrörets diameter.



Figur 6-3. Installationsfaser för mantelinjekterade stålrörspålar (Ruukki 2007).

I vatten uppstår det kraftigaste angreppet i vattenlinjen. Ett effektivt sätt att skydda spont är att gjuta ner krönbalk till ca 1 m under medellågvattenytan, se figur 6-4.



Figur 6-4. Nedgjutning av krönbalk (Sandberg 2002)

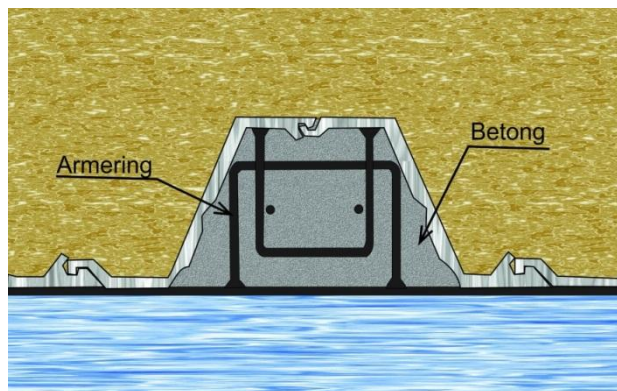
Även stålplåtar kan skyddas i vattenlinjen. Kringggjutningen görs då med hjälp av ett yttre rör som fungerar som en form. Vid nybyggnation kan antingen stål rör eller PEH-rör typ vattenledningsrör användas. Dessa träs på pålen och fixeras så att pålen blir jämnt kringggjuten. Nederkanten på rören bör placeras ca 1 m under medellågvattenytan och spalten mellan påle och rör bör vara 50-60 mm. PEH-rören är tjockväggiga, minst 20 mm och minst 15 års erfarenheter finns idag från hamnar med isvintrar. Stålrören har oftast en godstjocklek på ca 10 mm vilket innebär att reparation/utbyte behöver ske efter 30-35 år.

På pålar under befintligt påddäck kan svep av syrafast rostfritt stål utnyttjas. Dessa består av två halvor som monteras med hjälp av distanser innan bruk injekteras. Viktigt är att säkerställa är att svepet inte får metallisk kontakt med stålplåten. Om så sker uppstår galvanisk korrosion på pålen. Svepen kan missfärgas och i vissa fall få lokala frätgropar. Detta är kosmetiska skador som inte påverkar svepens funktion.

6.5 Påsvetsning

Genom att svetsa på förstärkningsplåtar (minimum 10 mm tjocka) i zonen vid vattenlinjen kan en sponts livslängd ökas. Viktigt är att detta sker innan hål börjar uppträda och bakomliggande massor spolas ut. Plåtarna bör vara ca 2 m långa och formade för att passa spontens profil. Före påsvetsning rengörs spanten med högtryck eller annan lämplig metod.

En alternativ metod är att svetsa plana stålplåtar mellan utgående plankor. Armeringsjärn kan innan dess ha svetsats fast på spont och plåt, se figur 6-8. Efter att botten tätats gjuts utrymmet full med betong.



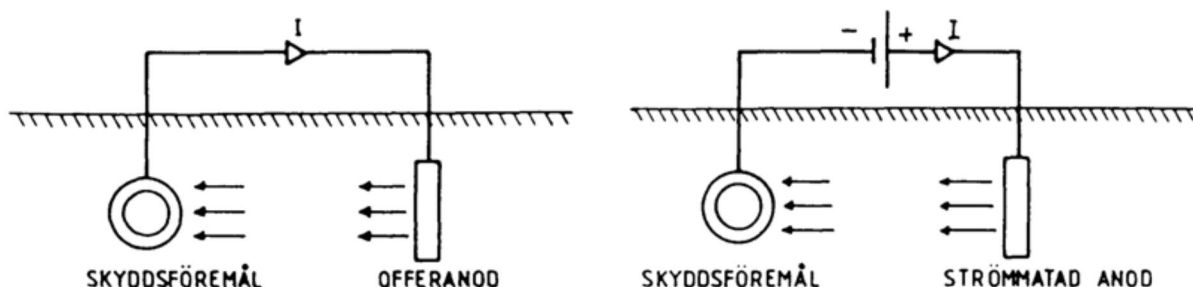
Figur 6-8. Påsvetsning och betongggjutning (efter Braekell 2005).

6.6 Katodiskt skydd

Pålar och spont kan korrosionsskyddas med katodiskt skydd. Skydd av pålar i jord är ovanligt medan skydd av spont i vatten, till exempel i hamnanläggningar, är mer vanligt.

Vid katodiskt skydd av pålar i jord bör pålarna vara belagda med en organisk skyddsbeläggning, så att skyddsströmmen blir liten med åtföljande liten risk för skadlig läckströmspåverkan på närliggande metallkonstruktioner. Vidare bör alla pålar vara i metallisk kontakt med varandra. Grundläggande krav på katodiskt skydd av jordförlagda konstruktioner beskrivs i svensk standard SS-EN 12954. För skydd av konstruktioner i vatten gäller SS-EN 12473.

Katodiskt skydd innebär att en svag likström, den så kallade skyddsströmmen, matas ut genom jorden eller vattnet till stålytan. Därigenom blir ytan så elektriskt negativ att korrosionen upphör. Den katodiska skyddsströmmen matas ut i jorden/vattnet via speciella metallektroder, s.k. anoder. Strömmen kan alstras på två olika sätt och man skiljer därför mellan två olika typer av katodiskt skydd, nämligen skydd med offeranoder och skydd med påtryckt ström, se figur 6-9.



Figur 6-9. Katodiskt skydd med offeranoder respektive påtryckt ström.

Vid skydd med offeranoder alstras skyddsströmmen på galvanisk väg. Anodmaterialet är oädlare än stålet, och det föreligger en galvanisk spänning mellan anoden och stålytan, som driver skyddsströmmen. Någon yttre strömkälla behövs alltså inte. I jord används oftast magnesium som anodmaterial. I vatten används aluminium och zink. För omålade spont i vatten kan inte offeranoder användas om resistiviteten överstiger ca 1,2 Ωm (Sandberg 2002). Detta motsvarar ungefär salthalten i Östersjön i nivå med Åland. Ska fullständigt skydd av spont uppnås vid lägre salthalter krävs en kombination med målning. I och med strömgivningen och egenkorrosion förbrukas offeranoder med tiden. Normalt dimensioneras de för 15-20 år.

Vid skydd med påtryckt ström alstras strömmen med en yttre strömkälla, som vanligen är en nätansluten transformator/likriktare. Anoden och skyddsobjektet ansluts till likriktarens plus- respektive minusutgång, så att ström matas från anoden, genom jorden/vattnet till stålytan. Utgående likspänning är normalt lägre än ca 10 Vdc, och alltid lägre än 50 Vdc, varför det inte uppstår några personfarliga elektriska spänningar i skyddsobjektet. Materialet i strömmatade anoder är vanligen kiseljärn, magnetitjärn eller titan belagt med en blandning av ädelmetalloxider. Dessa material är i det närmaste inerta vilket innebär att de knappast förbrukas med tiden, och anoden får därmed mycket lång livslängd. Genom möjligheten att reglera den utgående likspänningen och därmed skyddsströmmens storlek är tillämpningen av skydd med påtryckt ström inte begränsad av jordens/vattnets ledningsförmåga.

Katodiska skydd med påtryckt ström måste kontrollmätas. Mättekniken beskrivs i SS-EN 13509.

Normalt skyddas hela konstruktionen men i medier med högre resistivitet som jord, sötvatten och bräckt vatten kan även ett lokalt skydd installeras.

6.7 Utbyte/förändring av omgivande jord/bottensediment

Som framgick av avsnitt 4.3 så har jordens kemiska, fysikaliska och mikrobiologiska egenskaper ingen eller mycket liten betydelse för korrosionen från en nivå strax under grundvattenytan och längre ner. Att byta ut eller på annat sätt påverka jorden har således endast effekt ovanför grundvattenytan. Det är ovanligt med så sura jordar att vätejoner bidrar som bränsle i korrosionsprocessen. Den enskilt viktigaste parametern är därför jordens syresättning. Att låta bli att röra om i jorden eller att noggrant kompaktera den samma efter eventuell omgrävning är sannolikt viktigare än att ändra dess kemiska egenskaper.

Jordens syrsättning kan även minskas aktivt, t.ex. genom ett ovanliggande betongdäck. I en japansk undersökning (Ohsaki 1982) har man kunnat visa att ett ovanliggande betongdäck i jord visserligen gav upphov till en mätbar galvanisk korrosion på ståltytor i jord strax under betongen, men att denna korrosion minskade i tiden och att betongen istället fungerade som en diffusionsspärr för syre. Redan efter 10 år var korrosionen lägre i det fallet att pålarnas överdel ingick i betongdäcket.

I anaeroba bottensediment kan förhöjd korrosion p.g.a. mikrobiell aktivitet inte uteslutas. För att minska korrosiviteten i dylika sediment finns metoder för "soil-mixing" och "jet grouting" (Task 2012).

6.8 Kombination av olika skyddsåtgärder

För att kompensera för förväntad avrostning kan pålen eller sponten dimensioneras baserat på en viss rostmån. Detta ska ske baserat på den mest korrosionsutsatta delen. Denna del är koncentrerad till grundvattenytan i jord och till vattenlinjen i vatten. Att överdimensionera hela pålen/sponten kan dock bli både dyrt och i vissa fall praktiskt omöjligt. I saltvatten är korrosionshastigheten i vattenlinjen ca 0,3 mm/år. Rostmån för 120 år innebär en extra godstjocklek på 36 mm. Samtidigt är avrostningen i bottensedimenten lägre än 2 mm under samma period. Genom att applicera ett korrosionsskydd i vattenlinjen i kombination med rostmån för resten av sponten kan en tekniskt/ekonomiskt optimal lösning uppnås. Sådana lokala åtgärder i vattenlinjen/grundvattenytan kan t.ex. vara ingjutning i betong, påsvetsning eller ett lokalt katodiskt skydd.

Ett alternativ till rostmån är att korrosionsskydda hela konstruktionen. Om korrosionsskyddet endast beräknas ha en viss livslängd och denna understiger konstruktionens livslängd kan korrosionsskyddet istället reducera erforderlig rostmån. Tänkbara korrosionsskydd är i detta fall ytbeläggning och/eller katodiskt skydd. På pålar i jord kan en ytbeläggning, även om den skadas vid slagning, medföra en kraftig reduktion av korrosionshastigheten i den mest utsatta zonen strax under grundvattenytan, se avsnitt 6.2.

Att åstadkomma en helt perfekt ytbeläggning som förblir intakt under lång tid är på gränsen till omöjligt och skulle bli kostsamt. Att kombinera målning och katodiskt skydd har i många applikationer visat sig vara en ekonomiskt optimal lösning. Skador i ytbeläggningen kan accepteras och antalet anoder blir begränsat. Dessutom minskar risken för läckströmskorrosion på angränsande konstruktioner och utsläppen av metalljoner (offeranoder) respektive klorgas (påtryckt ström) blir mindre. Detta gäller i första hand för konstruktioner i vatten.

Om man har utfört en reparation med hjälp av påsvetsning kan det vara en god ide att kombinera detta med ett katodiskt skydd som säkerställer att fortsatta angrepp stoppas och att svetsarna skyddas.

7. Krav i normer och standarder

Uppgifter om hur hänsyn kan tas till korrosion på pÅlar och spont i jord och vatten finns dels i standarden SS-EN 1993-5:2007 dels i Pålkommissionens rapport 98. VTT har också tagit fram ett förslag på dimensionering med rostmÅn för stÅlrörspÅlar i jord (Törnqvist 2004).

I detta kapitel redovisas vilka krav/rekommendationer som ges i dokumenten och pÅ vilka punkter de skiljer sig Åt. I kapitel 8 diskuteras därefter troliga orsaker till dessa skillnader och vilka brister respektive dokument har jämfört med de andra.

7.1 Dimensionering enligt Eurokod SS-EN 1993-5

Enligt SS-EN 1993-5:2007, Eurokod 3: Dimensionering av stÅlkonstruktioner - Del 5: PÅlar och spont kan hänsyn till korrosion tas genom:

- tillÄgg av rostmÅn
- extra sÅkerhet
- korrosionsskyddande belÄggningar
- anvÄndning av katodiskt skydd
- ingjutning i betong eller med injektering.

Vid verifiering av pÅlars bÄrförmÅga skall man i bÅde brott- och bruksgrÄnstillstÅnd beakta en jÄmn avrostning runt hela pÅlens periferi.

Dimensionerande korrosionshastigheter (uttryckt som tjockleksförlust per tid) vid olika jord- och vattenförhÅllanden anges som funktion av konstruktionens livslÄngd, se tabell 7-1 och 7-2.

Korrosionshastigheten i luft anges till 0,01 mm/År under normala betingelser och 0,02 mm/År i marin atmosfär. Det anges också att passande värden pÅ korrosionshastigheter med hänsyn till lokala förhÅllanden kan anges i en Nationell Bilaga till standarden.

Korrosionen inuti ihÅliga pÅlar, som har vattentÄta Ändar eller, som Är fyllda med betong kan man försumma.

Tabell 7-1. Tjockleksförlust p.g.a. korrosion på stålplåtar och stålspons i jord med och utan grundvatten, som underlag vid beräkning av rostmån vid olika livslängder.

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

Anmärkningar:

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

Tabell 7-2. Tjockleksförlust p.g.a. korrosion på stålplåtar och stålspons i sötvatten och havsvatten, som underlag vid beräkning av rostmån vid olika livslängder.

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

Anmärkningar:

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

7.2 Dimensionering enligt Pålkommisionens rapport 98

Dimensioneringen skall ske med hänsyn till den mest korrosionsutsatta delen av pålen. Dimensioneringen med rostmån enligt Pålkommisionens rapport 98 (Bengtsson 2000) gäller inte bara för slanka stålplåtar utan för alla typer av obelagda stålplåtar som drivs ned i ostörd jord. Dimensionering med rostmån skall utgå från kunskapen om jord- och grundvattenförhållanden på platsen och en bedömning av eventuell framtida förändring i dessa. Dimensioneringen kan indelas i:

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

Med enkla förhållanden avses naturlig jord (ej sulfidhaltig jord) och fyllning av friktionsjord med känd sammansättning förutsatt att grundvattnet är sött och ej kemiskt aggressivt och att större framtida ändringar av förhållandena ej förutses. Under sådana förhållanden kan dimensionerande rostmån för 100 års livslängd bestämmas från tabell 7-3.

Tabell 7-3. Dimensionerande rostmån för 100 år i jord vid enkla förhållanden.

GW = grundvattenytan

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

*) Över grundvattenytan inkluderar även området ned till 1 m under grundvattenytan.

I komplexa och korrosiva förhållanden bör livslängdsdimensionering utföras av geotekniskt och korrosionstekniskt sakkunniga i förening. Ett praktiskt förfaringsätt kan vara att förse pålarna med korrosionsskydd på delar som har komplex eller korrosiv omgivning, oftast en begränsad längd av övre delen.

Dimensionering kan ske genom tillämpning av värden enligt tabell 7-4 nedan. Dessa värden bör dock inte användas okritiskt av projektörer som saknar korrosionsteknisk kunskap.

Tabell 7-4 Dimensionerande rostmån för 100 år i jord, vissa komplexa och korrosiva förhållanden. GW = grundvattenytan.

Jordart	Dimensionerande rostmån, mm	
	Över GW	Under GW
Jord som genomsätts av havsvatten utom Bottenviken	5	3
Okontrollerad fyllning av naturlig jord	4	3

Helst bör dimensioneringen baseras på korrosivitetsundersökningar på pålningsplatsen. Korrosivitetsundersökningar kan bestå av pH-bestämning i jord och grundvatten, mätning av kloridhalt, ofta mätt som resistivitet, samt bestämning av grundvattennivå med variationsområde. Resultaten kräver sakkunnig utvärdering för tolkning till dimensionering av rostmån. Tolkningen måste även omfatta en prognos för framtida förändring av värdena i livslängdsperspektivet (100 år).

En särskild korrosivitetsundersökning bör alltid göras för pålar som ska stå i:

- avfallsdeponier (soptippar)
- fyllningar, som innehåller aska eller slagg
- kemisk processindustrimiljö eller avfall från sådana industrier
- miljöer, där elektriska likströmmar kan förekomma i marken.

I Pålkommisionen rapport 98 (Bengtsson 2000) anges att rörpålar också skall dimensioneras för invändig korrosion om de inte fylls med betong eller cementbruk. Värden anges i tabell 7-5.

Tabell 7-5. Dimensionerande, invändig rostmån för 100 år.

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

Avfrättningshastigheten på oskyddade stålpålar i vatten är som regel betydligt högre än på pålar i jord, och vanligtvis högre i havsvatten (saltvatten) än i sötvatten. Rostmånen blir därför betydligt större i vatten än i jord. Dimensionerande värde på rostmånen i olika typer av vatten återfinns i tabell 7-6. För oskyddade pålar, som dimensioneras för lång livslängd i vatten blir rostmånen i många fall opraktiskt stor. I sådana fall är det vanligen lämpligare att använda pålar med korrosionsskydd, eventuellt i kombination med reducerad rostmån. Den reducerade rostmånen bestäms från fall till fall med hänsyn bl.a. till typ av korrosionsskydd.

Tabell 7-6. Dimensionerande rostmån för 100 år i vatten samt för påldelar i fyllning av sprängsten eller grovt grus i vatten.

Zon	Dimensionerande rostmån, mm			
	Sött sjö-vatten	Sött ström-mande vatten	Bräckt vatten, halt NaCl 0,25-1 %	Salt vatten, halt NaCl >1%
Luftzon	5	5	10	10
Skvalpzon	20	20	30	30
Undervattenszon	5	10	10	10
Vid botten, ej eroderande sediment	5	10	10	10
Vid botten, eroderande sediment	20	20	30	30
I bottensediment	2	2	2	5

7.3 Dimensionering enligt VTT

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

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

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

där:

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

t = tid, år

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

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

$$\text{Gropfrättningsfaktor} = \frac{\text{största frätgropsdjup} - \text{medelkorrosionens djup}}{\text{medelkorrosionens djup}}$$

Med medelkorrosion menas medelfrättdjupet vid jämn korrosion. Den dimensionerande korrosionen beräknas nu enligt formeln:

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

där:

s_d = dimensionerande rostmån, mm

v_d = dimensionerande gropfrättningsfaktor

t = tid, år

I formeln är faktorn 0,2 den invändiga avfrätningen.

Den dimensionerande gropfrättningsfaktorn varierar beroende på de geotekniska förhållandena och därmed varierar också den dimensionerande rostmånen med dessa förhållanden, se tabell 7-7.

Tabell 7-7. Dimensionerande rostmån för 100 år för tre olika geotekniska förhållanden.

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

För aggressiva förhållanden kan inte de dimensionerande rostmånen enligt tabell 7-7 användas. För dessa förhållanden dimensioneras rostmånen särskilt från fall till fall. Som aggressiva förhållanden räknas:

- jord, som innehåller rikligt med organiska beståndsdelar
- jord, som innehåller rikligt med svavel
- lös fyllnadsjord, särskilt där utfyllnaden kan anrikas med salter (bland annat lösa fyllnader där havsvatten kan tränga in)
- jord med variationer i grundvattenytans nivå
- alla förorenade jordar
- jordar med potentialfält orsakade av likströmskällor.

7.4 TRVK Bro 11

I bilaga 5 till TRVK Bro 11 *”Korrosionshänsyn för stålprofiler neddrivna i jord”* hänvisas till Pålkommisionens rapport 98 (Bengtsson 2000). Eftersom bilaga 5 gäller för stålprofiler i jord är det inte uppenbart att tabell 7.7 i rapport 98, som behandlar dimensionerande rostmån för konstruktioner i vatten, gäller som krav i TRVK Bro 11. Nedan återges texten i Bilaga 5.

Korrosionshänsyn

Stålprofilernas beständighet ska beaktas enligt ”Dimensioneringsanvisningar för slagna slanka stålplåtar” (Pålkommisionen), kapitel 7 där all text ska gälla som krav. Dock ska följande ändringar och tillägg gälla:

- *Tabellvärden ska proportioneras till aktuell livslängdsklass.*
- *Dimensionerande invändig rostmån enligt tabell 7.42 ska sättas till 2 mm.*
- *Kringgjutning utan foderrör enligt 7.82 får inte betraktas som ett tillräckligt korrosionsskydd.*
- *Tunna organiska beläggningar enligt 7.93 får inte betraktas som ett tillräckligt korrosionsskydd.*

Objektspecifikt byggherreval, se A.1.3.

Omfattning av ytbehandling

Vid ingjutning av ytbehandlade stålprofiler i betong ska ytbehandlingen täcka profilen minst 50 mm in i betongen. Motsvarande mått är minst 100 mm om gjutningen utförs mot jord.

Påldetaljer

För pålskor och pålskarvar ska följande värden på dimensionerande avrostning tillämpas för tekniska livslängder ≤ 120 år:

- Ytorna i spalten mellan dubben och hylsan i bergskor: 1,0 mm.
- Ytorna i små slutna utrymmen som t.ex. i en skarv till en förtillverkad betongpåle: 0,2 mm. Under förutsättning att de i skarven ingående komponenterna fettas in i anslutning till att de i monteringen får den dimensionerande avrostningen sätts till noll.
- Ytorna i spalten mellan skarvhalvorna i en skarv till en förtillverkad betongpåle: 1,0 mm.
- Ytorna i spalten mellan hylsan och pålelementet i en hylsskarv: 1,0 mm.
- För en gängad och hopskruvad rörskarv får den dimensionerande invändiga avrostningen sätts till noll under förutsättning att skarven fettas in i anslutning till monteringen.
- Ytorna i spalten mellan skarvhalvorna i en bultad skarv: 1,0 mm.
- Ytorna på ståldelar inslagna i trä vid skarvning av träpålar: 1,0 mm.

8. Kritisk granskning av uppställda krav på rostmån

I pålkommissionens rapport nummer 98 (Bengtsson 2000), SS-EN 1993-5:2007 (Eurokoden) och i VTT:s rapport (Törnqvist 2004) ges rekommendationer avseende dimensionering med rostmån. Kategoriseringen av jord- och vattenförhållandena är inte de samma och rekommenderade värden varierar, i många fall kraftigt, mellan de olika dokumenten. Med stöd av genomförd litteraturgranskning görs i de följande en kritisk granskning av de olika föreslagna dimensionerande rostmånen.

8.1 Jord

Dimensionerande värden på rostmån tagna från de tre dokumenten har sammanställts till en tabell, se tabell 8-1. I Eurokoden och av VTT ges endast ett värde; i tabellen har detta värde angivits för både över och under grundvattenytan.

Tabell 8-1. Dimensionerande rostmån för 100 år enligt Eurokoden (SS-EN 1993-5:2007), Pålkommissionen rapport 98 (Bengtsson 2000) respektive VTT (Törnqvist 2004).
GW = grundvattenytan.

Förhållande	Eurokoden		Pålkommissionen		VTT	
	Över GW	Under GW	Över GW	Under GW	Över GW	Under GW
Ostörd naturlig jord (sand, grusiga moräner)	1,2	1,2	2,0	2,0	1,0	1,0
Ostörd naturlig jord (lera, silt, leriga/siltiga moräner)	1,2	1,2	3,0	2,0	1,0	1,0
Packad icke aggressiv fyllning (okontrollerad fyllning av naturlig jord)	1,1	1,1	4,0	3,0	1,3	1,3
Icke packad icke aggressiv fyllning (okontrollerad fyllning av naturlig jord)	2,2	2,2	4,0	3,0	1,8	1,8
Förorenad naturlig jord och jord i industriområde	3,0	3,0	U	U	U	U
Aggressiv naturlig jord (kärr, gytta, torv etc.)	3,25	3,25	4,0	3,0	U	U
Packad aggressiv fyllning (askor, slagg etc.)	2,9	2,9	U	U	U	U
Icke packad aggressiv fyllning (askor, slagg etc.)	5,75	5,75	U	U	U	U
Jord som genomsätts av havsvatten			5,0	3,0	U	U
Läckström			U	U	U	U

U = krav på särskild korrosivitetsundersökning.

I det följande diskuteras varje jordförhållande separat och ett förslag på dimensionerande rostmån ges. Den dimensionerande rostmånen är här definierad som karakteristisk korrosionshastighet gånger en partialkoefficient för att ta hänsyn till osäkerheten i bestämningen av korrosionshastigheten. Denna partialkoefficient har satts till 1,5. Med karakteristisk korrosionshastighet avses medelvärde för den lokalt högsta jämna korrosionen d.v.s. inte korrosionshastigheten i de djupaste frätgroparna.

8.1.1 Allmänt

Ett genomgående resultat från genomförda långtidsexponeringar är att korrosionshastigheten är mycket låg på större djup än ca 1 m under grundvattenytan. Detta gäller oberoende av jordart eller jordens kemiska, fysikaliska eller mikrobiologiska egenskaper. Korrosionshastigheten varierar i intervallet 2-10 $\mu\text{m}/\text{år}$. Med ett medelvärde på 6 $\mu\text{m}/\text{år}$ bör en dimensionerande korrosionshastighet på ca 10 $\mu\text{m}/\text{år}$ kunna ansättas i alla jordförhållanden. Den dimensionerande rostmånen för 100 år bör således vara 1,0 mm i alla jordar, naturliga, fyllnadsjordar och förorenade samt aggressiva jordar på delar under grundvattenytan.

Det enda fall där högre korrosionshastighet kan uppstå under grundvattenytan är vid närvaro av läckström.

Ett annat fall som också bör behandlas separat är fallet då pålen/sponten går genom markytan och grundvattenytan samtidigt ligger mycket nära markytan. I detta fall kan korrosionshastigheten, lokalt i markbandet, bli så hög som 80 $\mu\text{m}/\text{år}$.

I de följande diskuteras således endast förhållandena från markytan och ner till en nivå ca 1 m under grundvattenytan.

8.1.2 Ostörd naturlig jord (sand, grusiga moräner)

I sand och grusiga moräner är korrosionshastigheten endast marginellt högre ovanför grundvattenytan än under. Av Eurokoden angivna värdet på 1,2 mm känns rimligt för rostmånen ovan grundvattenytan.

I dessa friktionsjordar kan man förmoda att grundvattenytan är mer distinkt än i lerjordar. Detta skulle tala för att den luftningscell som bildas kring grundvattenytan får mer markant avgränsade anod- respektive katodytor än i lerjordar. Konsekvensen borde bli ett mer koncentrerat angrepp strax under grundvattenytan. Att så inte verkar bli fallet beror troligen på att motståndet i jorden normalt är högre i sandjordar. Den drivande spänningen för korrosionsströmmen finns men motståndet är för högt. Skulle däremot sandjordens porvatten innehålla höga kloridhalter kan man på goda grunder utgå från att korrosionshastigheten blir hög. Detta fall behandlas i avsnitt 8.1.10.

I standarden anges korrosionshastigheten i ostörd jord (naturlig, aggressiv och förorenad) vara konstant i tiden. Detta överensstämmer med svenska erfarenheter.

8.1.3 Ostörd naturlig jord (lera, silt, leriga/siltiga moräner)

I lera är risken för förhöjd korrosion orsakad av en lokal luftningscell större än i sand och morän. Detta beror inte på jordarten i sig, ty i lera blir grundvattenytan mindre distinkt än i sand, utan p.g.a. den i många fall lägre resistiviteten. Det vore således mer relevant att skilja mellan låg- och högresistiv jord vid bedömning av korrosionen över grundvattenytan. Detta eftersom korrosionen styrs av en luftningscell som behöver en minsta ledningsförmåga för att ge angrepp av betydelse.

Korrosionshastigheter på 18 µm/år har mätts upp (Vinka 2011b, Skå) men annars är det sällsynt med värden över 15 µm/år. Jorden på Skå är dessutom en gyttig lera d.v.s. ett gränsfall till att ingå i kategorin aggressiv jord. Rostmånen föreslås sättas till 2,0 mm.

8.1.4 Packad icke aggressiv fyllning (okontrollerad fyllning av naturlig jord)

Enligt Eurokoden ska rostmånen i "packad icke aggressiv fyllning" sättas till 1,1 mm. Troliken har tanken varit att jämställa packad fyllning med ostörd jord där rostmånen satts till 1,2 mm. Att värdet i packad fyllning blir lägre än i ostörd jord är sannolikt endast en konsekvens av att värdet i packad fyllning angivits till hälften av den angivna rostmånen för "icke packad och icke aggressiv fyllning".

I både packad och icke packad fyllning anges, i Eurokoden, en högre korrosionshastighet under perioden 0-25 år än under perioden 25-100 år, d.v.s. en initialt högre korrosionshastighet. Även detta visar på det orimliga med en lägre rostmån i packad fyllning än i ostörd jord.

VTT anger rostmånen i packad fyllning till 1,3 mm d.v.s. något högre än i ostörd jord, 1,0 mm.

Pålkommissionen gör ingen skillnad på packad och inte packad fyllning och rostmånen sätts till 4,0 mm i "okontrollerad fyllning av naturlig jord". Den högsta och därmed dimensionerande korrosionshastigheten uppstår strax under grundvattenytan och den kontrolleras av jordens luftning i kombination med dess resistivitet. En packad fyllning har samma resistivitet som en ostörd jord av samma typ. Luftningen kan vara något större men även ur detta hänseende bör skillnaden inte vara stor.

I avsnitt 8.1.2 och 8.1.3 kom vi fram till en rostmån för 100 år i ostörd jord på 1,0 mm i sand/morän och 2,0 mm i lera. Ostörd jord kan jämföras med packad icke aggressiv fyllning. Enligt Eurokoden är korrosionshastigheten under de första 25 åren 40% högre än under de därpå följande 75 åren. Detta skulle innebära en rostmån på 1,1 mm respektive 2,2 mm i packade fyllningar. För okontrollerad fyllning av naturlig jord bör det högre värdet tillämpas.

8.1.5 Icke packad icke aggressiv fyllning (okontrollerad fyllning av naturlig jord)

Enligt Eurokoden är korrosionshastigheten i icke packad fyllning dubbelt så hög som i packad fyllning. Denna skillnad bibehålls under alla 100 år. Rimligen borde skillnaderna minska med tiden.

Vår bedömning är att, i icke packad fyllning, bör man räkna med fördubblad korrosionshastighet under de första 25 åren och därefter samma korrosionshastighet som i packad fyllning. Detta medför 20% mer korrosion i icke packad fyllning under en 100-årsperiod. Rostmånen i ”packad och icke aggressiv fyllning” angavs till 2,2 mm, se kapitel 8.1.4. I icke packad och icke aggressiv fyllning blir avfrätningen då 2,5 mm.

8.1.6 Förorenad naturlig jord och jord i industriområde

I förorenad naturlig jord och i industriområden anges i Eurokoden en konstant dimensionerande korrosionshastighet på 30 $\mu\text{m}/\text{år}$. I pålkommissionens rapport 98 anges inget värde. Rostmånen sätts enligt Eurokoden till 3,0 mm.

8.1.7 Aggressiv naturlig jord (kärr, gyttja, torv etc)

I aggressiva naturliga jordar anger Eurokoden en rostmån på 3,25 mm och Pålkommissionen 4,0 mm (över grundvattenytan).

Den högsta avfrätningen som noterats efter långtidsexponering (27 år) i gyttjig lera låg på 18 $\mu\text{m}/\text{år}$. Mindre kolstålsplåtar exponerade i omrörd gyttjig lera uppvisade under 7 år en genomsnittlig korrosionshastighet på 29 $\mu\text{m}/\text{år}$. Motsvarande värde i torv var 15 $\mu\text{m}/\text{år}$ (Camitz 1989). Med beaktande av den korta tiden och att jorden var omrörd så känns de ovan angivna rostmånerna som alltför höga.

Höga korrosionshastigheter kan uppstå om pålen/sponten går genom markytan samtidigt som grundvattenytan ligger nära markytan, vilket inte är ovanligt i kärr, myrar och gamla havsbottnar. Detta fall behandlas dock separat i avsnitt 8.1.12. Exkluderas detta fall bör inte rostmånen sättas högre än 3,0 mm.

8.1.8 Packad aggressiv fyllning (askor, slagg etc)

Enligt Eurokoden ska rostmånen i packad aggressiv fyllning sättas till 2,9 mm. Både Pålkommissionen och VTT rekommenderar att korrosionsundersökningar ska utföras. I Pålkommissionens rapport 105 (Camitz 2009) görs dock bedömningen att i Eurokoden ansatta värden för aggressiva fyllningar är rimliga. Värdet sätts således till 2,9 mm.

8.1.9 Icke packad aggressiv fyllning (askor, slagg etc)

I Eurokoden anges rostmånen till 5,75 mm. Liksom för packad aggressiv fyllning föreslås av Pålkommisionen och VTT korrosionsundersökning. I Pålkommisionen rapport 105 (Camitz 2009) bedöms rostmånen enligt Eurokoden som rimlig.

Man skulle kunna invända mot att skillnaderna i korrosionshastighet mellan packad och icke packad fyllning antas bestå även under lång tid, se tabell 8-3. Vi saknar dock resultat som gör att vi kan ifrågasätta det av Eurokoden angivna värdet.

Tabell 8-3. Korrosionshastigheter beräknade utgående från i Eurokoden angivna rostmåner i packad respektive icke packad aggressiv fyllning.

Jordförhållande	Korrosionshastighet, $\mu\text{m}/\text{år}$	
	0-25 år	25-100 år
Packad fyllning	40	25
Icke packad fyllning	80	50

Jord som innehåller kol och koks måste betraktas som ett specialfall. Dessa material kan ge upphov till galvanisk korrosion på stål. Under grundvattenytan begränsas den galvaniska korrosionen av bristen på oxidationsmedel, syre, men inte ovanför grundvattenytan. Vid galvanisk korrosion är ytförhållandet mellan anod och katod avgörande för korrosionshastigheten. En stor katodyta (kol/koks) ger kraftigare galvanisk korrosion. Packad fyllning innehållande rester av kol och koks innebär en större risk eftersom fler koksbitar kan komma i kontakt med varandra och skapa en större katodyta. Med kol/koks i jorden bör delar ovanför grundvattenytan förses med korrosionsskydd.

8.1.10 Jordar som genomsätts av havsvatten

Marina sediment eller jord som genomsätts av havsvatten uppvisar som andra jordar en låg korrosivitet under grundvattenytan. Över grundvattenytan kan dock korrosionshastigheten bli hög. Korrosionen orsakas av en luftningscell och korrosionshastigheten ökar ju lägre resistiviteten är. De norska undersökningarna (Tungesvik 1976 och Fischer 1981) visar att korrosionshastigheter på 100-200 $\mu\text{m}/\text{år}$ inte kan uteslutas vilket skulle motsvara en rostmån för 100 år på 10-20 mm.

Om konstruktionen passerar genom grundvattenytan och jorden innehåller höga kloridhalter bör delen ovanför grundvattenytan förses med någon form av korrosionsskydd.

8.1.11 Mark med läckströmmar

Korrosion orsakad av läckström kan ge upphov till höga korrosionshastigheter även i syrefria miljöer såsom under grundvattenytan.

Om pålar/spont ska slås nära banvall till likströmsdriven bana eller på sträcka med signalspår bör förekomst av läckström undersökas, se avsnitt 9.1.3. Det samma gäller om det finns ett närbeläget katodiskt skydd av en främmande konstruktion.

Gradienter i marken som kan ge upphov till läckströmspåverkan kan också vara orsakade av en HVDC-elektrod på många km avstånd. Det krävs dock att den påverkade konstruktionen har en inte försumbar utsträckning i horisontell led d.v.s. en enskild påle som inte har metallisk kontakt med någon annan konstruktion löper ingen risk.

8.1.12 Påle/spont som går genom markytan

Undersökningar har visat att lokalt höga korrosionshastigheter kan uppstå om konstruktionen går genom markytan och samtidigt grundvattenytan ligger nära markytan. I dessa fall kan ingen rostman anges utan någon form av korrosionsskydd bör appliceras t.ex. ingjutning i betong. Korrosionsskyddet bör sträcka sig ner till under grundvattenytan.

8.1.13 Förslag på rostmåner

Utgående från de i ovanstående avsnitt genomförda diskussionerna har tabell 8-4 tagits fram.

Tabell 8-4. Förslag på dimensionerande rostmåner för 100 år i jord.

Förhållande	Över GW*	Under GW	Anmärkning
Ostörd jord (sand, grusiga moräner)	1,2	1,0	
Ostörd jord (lera, silt, leriga/siltiga moräner)	2,0	1,0	
Packad icke aggressiv fyllning (okontrollerad naturlig jord)	2,2	1,0	
Icke packad icke aggressiv fyllning (okontrollerad naturlig jord)	2,9	1,0	
Förorenad naturlig jord och jord i industriområde	3,0	1,0	
Aggressiv naturlig jord (kärr, gyttja, torv etc.)	3,0	1,0	
Packad aggressiv fyllning (askor, slagg etc.)	2,9	1,0	
Icke packad aggressiv fyllning (askor, slagg etc.)	5,75	1,0	
Jord innehållande kol eller koks	K	1,0	
Jord som genomsätts av havsvatten och marina leror	K	1,0	
Läckström	U	U	Kontroll vid misstanke
Påle/spont som går genom markytan	K	1,0	Om hög grundvattenyta

*Inkluderar också ner till 1 m under grundvattenytan.

U = förundersökning krävs.

K = Korrosionsskydd krävs på konstruktionens övre del.

Vissa förhållanden måste specialbehandlas, nämligen:

- jord som innehåller kol eller koks
- jord som genomsläppts av saltvatten eller marina leror ovanför grundvattenytan
- närvaro läckström
- påle/spont går genom markytan.

I dessa fall bör andra åtgärder än rostmån övervägas/tillämpas alternativt kan rostmån i kombination med annan åtgärd vara aktuell.

Om vi bortser från dessa fall och fallet ”Icke packade aggressiva fyllningar” så kan vi se att rostmånen varierar från 1,0 till 3,0 mm. Vi har också konstaterat att det inte är jordarten som är avgörande utan jordens luftning i kombination med dess resistivitet. Skillnader i luftning avtar med tiden varför jordens resistivitet kommer att avgöra om en lokalt förhöjd korrosion kommer att ske i grundvattenzonen eller inte.

Vid bristande geotekniskt underlag skulle resultat från resistivitetmätningar kunna utgöra underlag för beslutet av rostmån i de fall som inte behöver specialbehandlas. Ett förslag ges i tabell 8-5. Vilka gränser som bör tillämpas bör studeras närmare.

Tabell 8-5. Förslag på rostmån för 100 år baserat på uppmätt resistivitet i zonen ovanför grundvattenytan.

Resistivitet, Ωm	Rostmån över GW, mm
< 20	3,0
20-50	2,0
> 50	1,0

8.2 Invändigt i rörpåle

VTT (Törnqvist 2004) har utfört omfattande beräkningar och kommit fram till en dimensionerande avfrätning på 0,2 mm. I Pålskommissionens rapport 98 (Bengtsson 2000) anges värdena 1,0 mm (sött vatten) och 1,5 mm (salt, bräckt vatten).

Korrosionshastigheten, i den mest utsatta zonen, kommer att kontrolleras av faktorer som mängd inträngande vatten (kvarvarande luftvolym), vattennivåns variation och yttre tryckvariationer. Vattnets kloridhalt är inte av någon mätbar betydelse. Korrosionen omfattning kommer att bestämmas av mängden syre i den instängda luften. Eftersom tillförseln av ny luft, via otäta skarvar eller pålskon, är kraftigt begränsad så blir korrosionen inuti en påle mycket mindre än den som uppstår i vattenlinjen på t.ex. en fritt exponerad spont. Den maximala korrosionen på utsidan kan endast i undantag förväntas ske på samma nivå som på insidan. Allt detta talar för att de i Pålskommissionen angivna värdena är för höga.

En mer ingående analys av den invändiga korrosionens förväntade storlek kommer att ske i ett senare skede av detta projekt.

8.3 Vatten

De dimensionerande rostmånera i dels Eurokoden dels Pålkommisionens rapport 98 har förts samman till en tabell, se tabell 8-6.

Tabell 8-6. Dimensionerande rostmån för 100 år i vatten enligt Eurokoden (SS-EN 1993-5:2007) och Pålkommisionens rapport 98 (Bengtsson 2000).

Zon	Dimensionerande rostmån, mm					
	Sötvatten		Förorenat Sötvatten	Bräckt Vatten	Havsvatten	
	Eurokod	Pålkom.	Eurokod	Pålkom.	Eurokod	Pålkom.
Luftzon		5		10		10
Skvalpzonen	1,4	20	4,3	30	7,5	30
Undervatten-zonen		5*		10**	3,5	10**
Botten		2		2		5

* Vid strömmande vatten 10 mm och vid botten med eroderande sediment 20 mm.

**Vid botten med eroderande sediment 30 mm.

8.3.1 Allmänt

Praktiska erfarenheterna från utförda inspektioner i Sverige är att det sällan finns några skador nära botten p.g.a. eroderande sediment. Däremot kan det finnas erosionsskador orsakade av propellerrörelser i kommersiella hamnar. Omfattningen av dessa skador, som uppstår i undervattenszonen, är svåra att förutse och måste bedömmas från fall till fall. I det följande beaktas inte denna typ av angrepp då lämpliga rostmåner diskuteras.

Korrosionen i atmosfärszonen, förutom skvalpzonen, respektive i bottensedimenten är inte bestämmande för konstruktionens livslängd och diskuteras inte i det följande.

Korrosionen i undervattensdelen är av intresse eftersom det största böjmomentet normalt uppstår någonstans i denna zon. Om åtgärder sätts in mot korrosionen i skvalpzonen så kommer spontens livslängd att bestämmas av korrosionen i undervattenszonen och därmed av tillämplig rostmån.

I skvalpzonen uppstår den maximala korrosionen. Det är också i denna zon som skillnaderna i olika tabellverk/standarder är som störst. Detta beror sannolikt på att korrosionen i denna zon utgörs av en kombination av jämn korrosion och gropkorrosion. I Eurokoden anges den dimensionerande korrosionen som tjockleksförlust vilket skulle kunna tolkas som att man bara tar hänsyn till den jämna korrosionen. I EAU (EAU 2004) finns två olika diagram för sötvatten respektive salt/bräckt vatten. Det ena anger den jämna korrosionen som bör utgöra underlag för beräkning av lastbärande kapacitet och det andra hastigheten hos gropkorrosionen d.v.s. tiden till dess att de första hålen börjar uppträda. Diagrammen anger karakteristiska värden, inte dimensionerande. I Pålkommisionens rapport 98 påstås angivna värden vara representativa för medelavfrätningen men de höga värdena tyder på att hänsyn även tagits till gropkorrosionen.

I tabell 8-7 har vi sammanställt de mest intressanta värdena från EAU, Eurokoden och Pålkommisionen. För EAU har vi utgått från de karakteristiska korrosionsvärdena för 50 år och multiplicerat med en faktor 3 (2 för 100 år och 1,5 som partialkoefficient).

Tabell 8-7. Dimensionerande rostmån för 100 år i skvalpzonen och undervattenszonen enligt EAU, Eurokoden och Pålkommisionen.

Zon	Rostmån (mm) Sötvatten			Rostmån (mm) Salt/Bräckt vatten		
	EAU*	Eurokod	Pålkom	EAU*	Eurokod	Pålkom
Jämn korrosion skvalpzon	4,8	1,4	20,0	11,2	7,5	30,0
Gropkorrosion skvalpzon	16,5			47,5		
Jämn korrosion undervattenzon	3,8		5,0	5,2	3,5	10,0

*Dubblerat angivet värde för 50 år och multiplicerat med 1,5 (partialkoefficient)

I det följande förs en diskussion kring de i tabellen angivna värdena.

8.3.2 Sötvatten

Underlaget från inspektioner av spont i svenska sötvatten är mycket begränsat. Ett betydligt större underlag finns från bl.a. Tyskland. Följande värden på den jämna korrosionen anges:

- skvalpzon: 30-40 µm/år
- undervattenszon: 20 µm/år.

I Sverige har vi mjukare och därmed mer korrosiva vatten än i Tyskland varför korrosionshastigheten i undervattenszonen bör sättas till 30 µm/år.

Med en partialkoefficient på 1,5 skulle detta motsvara följande rostmåner för 100 år:

- skvalpzon: 6 mm
- undervattenszon: 4,5 mm.

Dessa värden stämmer också ganska väl med de värden som anges i EAU. Skillnaden mot Eurokoden är dock stor.

I EAU anges den karakteristiska gropkorrosionen till 11 mm efter 100 år, vilket motsvarar en dimensionerande korrosion på ca 16 mm. De fåtal mätningar som gjorts i svenska sötvattenhamnar indikerade en medelavfrätning på 150±50 µm/år. Detta har legat till grund för Pålkommisionens värde på 20 mm i dimensionerande jämn korrosion i skvalpzonen. Enligt vår uppfattning har de svenska värdena påverkats av ett stort inslag av gropkorrosion. Värdet på 20 mm bedöms därför mer representativt för gropkorrosionen i skvalpzonen.

Några undersökningar som utgör underlag för Eurokodens rostmån i förorenat sötvatten har inte kunnat påträffas. Risken för gropkorrosion i skvalpzonen blir knappast lägre och möjligheterna för mikrobiell korrosion i undervattenszonen ökar. Permanent förorenade vattendrag måste dock tillhöra ovanligheterna i dagens Sverige varför detta förhållande förbises.

8.3.3 Bräckt och salt vatten

Med hänvisning till avsnitt 5.2 borde vi med ganska god säkerhet kunna sätta den jämna korrosionshastigheten i havsvatten till 50-55 $\mu\text{m}/\text{år}$ i undervattenszonen och 100 $\mu\text{m}/\text{år}$ i skvalpzonen för stålkonstruktioner med en exponeringstid på upp till 50 år. Vidare kan vi konstatera att skillnader i korrosionshastigheter är små mellan bräckt vatten och havsvatten.

Ett flertal statistiska bearbetningar av insamlade korrosionsdata vill göra gällande att korrosionshastigheten avtar med tiden. I områden som domineras av jämn korrosion är detta korrekt eftersom skyddande korrosionsprodukter byggs upp. Att tro att denna successiva sänkning fortgår även efter mycket långa tider är dock mindre troligt. Sannolikt uppstår en i tiden konstant korrosionshastighet efter en inledande fas på 5-10 år. Tillämpas ovan angivna korrosionshastigheter (0-50 år) även för perioden 50-100 år erhålls en viss säkerhetsmarginal. Med en korrosionshastighet av 50 respektive 100 $\mu\text{m}/\text{år}$ för undervattens- och skvalpzon, 100 års livslängd och partialkoefficient 1,5 (säkerhetsfaktor) blir de dimensionerande rostmånen:

- skvalpzon: 15 mm.
- undervattenszon: 7,5 mm

Gropkorrosionen i skvalpzonen avtar endast marginellt med tiden. Mycket tyder på att vi kan ansätta hastigheten för dessa lokala angrepp till 0,3 mm/år vilket innebär en dimensionerande rostmån för 100 år på 45 mm.

I litteraturen påtalas risk för mikrobiell korrosion endast i samband med ALWC som i sin tur är förknippad med tidvattenvariationer. Pågående undersökningar på Sundsvallsbron indikerar dock att mikrobiell aktivitet kan ge upphov till förhöjd korrosion även i undervattenszonen. Detta bör beaktas i det fortsatta arbetet med kravställning för dimensionering av pålar och pont.

8.3.4 Skiktat vatten

Normalt uppstår ett språngskikt mellan sött och salt vatten i en flodmynning. Var detta ligger och hur stor uppblandning som sker beror på en rad faktorer såsom avståndet från flodmynningen, årstider (flöden), vindförhållanden osv. Förhållandena i undervatten- och skvalpzonen kommer således att variera mellan vad som gäller för sött respektive salt vatten. Dimensionering av rostmån måste således göras efter det att förutsättningarna på plats studerats. Lämplig rostmån för 100 år, i skiktat vatten bör därför ligga inom nedanstående intervall:

- skvalpzon: 6 – 15 mm.
- undervattenszon: 4,5 – 7,5 mm

I EAU föreslås att rostmånen interpoleras. Troligen menar man att man kan ansätta ett linjärt samband mellan rostmån och salthalt.

8.3.5 Förslag på rostmåner

I Sverige är tidvattenvariationerna små vilket medför att både tidvattenzonen och lågvattenzonen kan bortses ifrån.

Korrosionshastigheten i atmosfärszonen och i bottensedimenten är lägre än i undervattenzonen och därmed inte dimensionerande eftersom det största böjmomentet återfinns i undervattenzonen.

Högst korrosionshastighet uppstår i skvalpzonen. Förutom en förhöjd jämn korrosion angrips stålet av gropkorrosion. Denna gropkorrosion gör att hål börjar uppträda efter ca 40 år på en spont med tjockleken 12 mm. Då detta inträffat kan bakomliggande massor komma att spolask ut, korrosionen övergår till att bli dubbelsidig och inom en begränsad tid skärs sponten av i vattenlinjen. Vi kan således konstatera att dimensionering med rostmån knappast är möjligt för en spont med 100 års livslängd utan stora skador i skvalpzonen.

Om åtgärder vidtas för att skydda skvalpzonen kan spontens livslängd baseras på en rostmån dimensionerad för undervattenzonen.

För 100 års livslängd måste således förebyggande åtgärder vidtas i skvalpzonen. För övriga delar föreslås dimensionering med rostmån ske enligt nedan:

- sötvatten: 4,5 mm
- skiktat vatten: 4,5-7,5 mm
- salt och bräckt vatten: 7,5 mm.

I hamnar med sjöfart måste erosionsskador p.g.a. propellerrörelser beaktas. I floder och älvar kan höga flöden förekomma. Om konstruktionen, under en stor del av året, exponeras för högre flöden krävs en högre rostmån. Om nya uppgifter avseende MIC (mikrobiell korrosion) framkommer så bör även dessa tas med i framtida krav.

9. Förundersökningar

9.1 Jordinstallationer

Före slagning av pålar och spont bör en geoteknisk undersökning genomföras. I denna bör ingå:

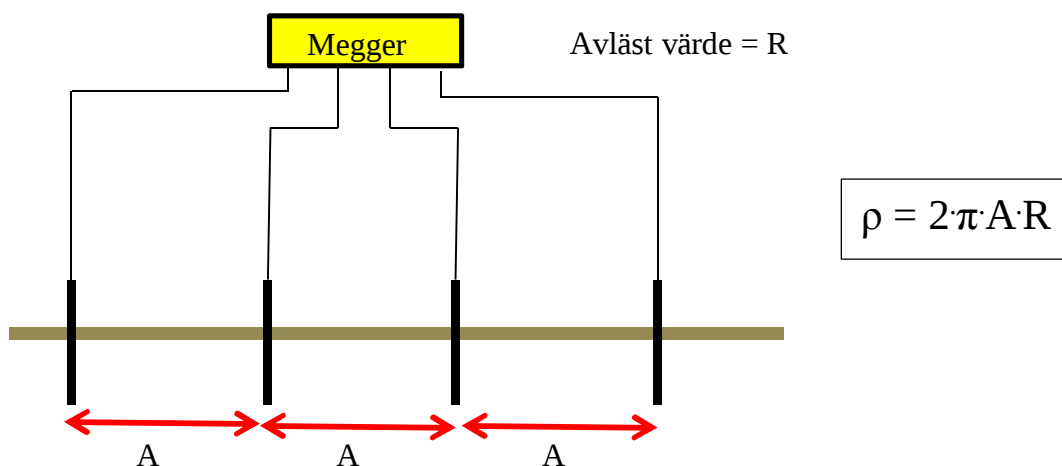
- Fastställande av jordtyp, kan i vissa fall ersättas med resistivitetsmätning.
- Uppmätning av grundvattenytans läge om korrosionsskyddande åtgärder planeras för konstruktionsdelar ovanför grundvattenytan.
- Uppmätning av elektriska gradienter om misstanke om läckströmspåverkan föreligger.

9.1.1 Fastställande av jordtyp

Jorden ovanför grundvattenytan ska placeras i någon av följande kategorier:

- ostörd jord (sand, grusiga moräner)
- ostörd jord (lera, silt, leriga/siltiga moräner)
- packad fyllning av okontrollerad naturlig jord
- icke packad fyllning av okontrollerad naturlig jord
- förorenad jord och jord i industriområde
- aggressiv naturlig jord (kärr, gytta, torv)
- packad aggressiv fyllning (askor, slagg etc.)
- icke packad aggressiv fyllning (askor, slagg etc.)
- jord innehållande kol eller koks
- jord som genomsetts av havsvatten eller marina leror.

Om jorden inte tillhör de tre sista typerna, föreslås enligt avsnitt 8.1.13, att istället för att kategorisera jorden kan resistivitmätning utföras. Detta görs enklast med Wennermetoden där fyra stålspett trycks ner i jorden. Mellan de båda yttre skickas en växelström och mellan de båda inre mäts ett spänningsfall som automatiskt omvandlas till ett resistansvärde. Detta kan sedan räknas om till en jordresistivitet baserat på valt avstånd mellan spetten, se figur 9-1.



Figur 9-1. Beräkning av resistivitet från uppmätt R-värde.

Uppmätt resistivitet utgör ett medelvärde för resistiviteten från markytan ner till ett djup som motsvarar avståndet mellan spetten, A.

9.1.2 Uppmätning av grundvattenytan

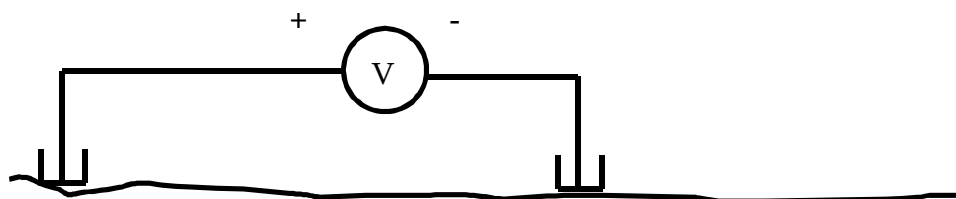
Om jordtypen kan ges en dimensionerande rostmån, enligt tabell 8-4, och man väljer att dimensionera efter värdet för "Över GW" så behöver inte grundvattenytans läge bestämmas.

Har man däremot för avsikt att tillämpa det lägre värdet för "Under GW" kompletterat med någon korrosionsskyddande åtgärd ovanför grundvattenytan ska dimensionerande grundvattenyta utredas.

9.1.3 Uppmätning av elektriska gradienter

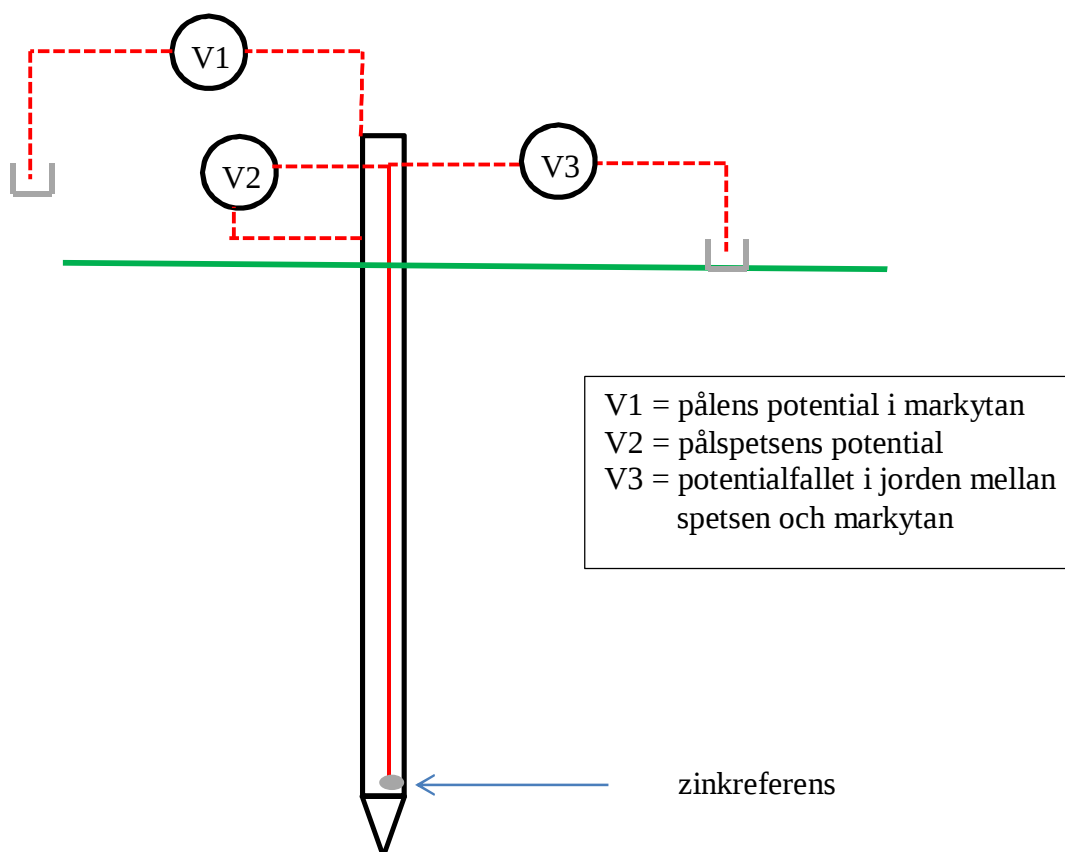
Läckströmspåverkan kan uppstå i närheten av likströmsdrivna banor eller på sträckor med signalspår. Risk finns också om en anodbädd ingående i ett katodiskt skydd med påtryckt ström finns i närområdet.

Förekomsten av läckströmmar kan kontrolleras genom att mäta om det finns några likspänningsgradienter i marken, se figur 9-2. Vid mätningarna utnyttjades ett höghohmigt universalinstrument ($>10\text{ M}\Omega$ i ingångsimpedans) och två referenselektroder av typen Cu/CuSO₄.



Figur 9-2. Gradientmätning.

Uppmäts gradienter bör källan identifieras och separat undersökning utföras. Mer information finns i SS-EN 50162. En svårighet är att uppställda kriterier i standarden bygger på att man ska mäta den påverkade konstruktionens potential med och utan påverkan från den yttre strömkällan. I ett projekteringsstadium finns av förklarliga skäl ingen konstruktion att mäta på. En väg att kringgå denna svårighet är att slå ner ett rör med en inbyggd referenselektrod, se figur 9-3.



Figur 9-3. Mätsond för mätning av gradient och potentialförändring i vertikal led.

9.2 Vatteninstallationer

På stålkonstruktioner med lång förväntad livslängd och som passerar genom vattenlinjen måste någon form av korrosionsskyddande åtgärder vidtas i en zon kring vattenlinjen. I ett projekteringsskede måste därför läget för medelhögvattennivån, medelvattennivån och medellågvattennivån bestämmas.

Vattnet ska kategoriseras som sött, bräckt/salt eller skiktat. För att kunna välja rostmån i skiktat vatten bör språngskiktets mest typiska läge fastställas.

Om konstruktionen ingår i en hamnanläggning med fartygstrafik måste risken för erosions-skador p.g.a. propellerrörelser beaktas. Utredning av planerad trafik bör således ingå i förundersökningen.

Om konstruktionen kommer att exponeras för strömmande vatten under en stor del av året bör, dels tiden med högt flöde per år, dels flödes hastigheten uppskattas.

10. Bedömning av korrosionsrisk och val av åtgärd

10.1 Konstruktioner i jord

Vid bedömning av korrosionsrisk och val av åtgärd bör följande underlag ingå:

- fastställd jordtyp
- grundvattenytans läge och kända eller rimliga framtida förändringar av grundvattenytans läge
- resultat från resistivitetsmätning i de fall bestämning av jordtyp kan ersättas med dylik mätning
- resultat från gradientmätning i de fall risk för läckström föreligger
- konstruktiv utformning:
 - oskyddad påle genom markytan
 - längd i horisontell led om pålar/spont sammanbundna med varandra
 - tom eller betongfylld rörpåle.

10.1.1 Utvändig korrosionsrisk

Om konstruktionens övre del slutar under grundvattenytan räcker det med en rostmån på 1,0 mm.

Om den oskyddade stålkonstruktionen går genom markytan krävs ett förstärkt korrosionsskydd i markbandet (rostmån otillräckligt).

Innehåller jorden kol eller koks krävs ett förstärkt korrosionsskydd på ytor från en meter under grundvattenytan och uppåt (rostmån otillräckligt).

Om jorden genomsätts av saltvatten krävs ett förstärkt korrosionsskydd på ytor från en meter under grundvattenytan och uppåt (rostmån otillräckligt).

Vid befarad läckströmspåverkan krävs fördjupad utredning av behov av åtgärder.

I alla övriga fall kan hänsyn till korrosion tas genom tillägg av rostmån, enligt tabell 8-4.

10.1.2 Åtgärder mot utvändig korrosion

Det är endast i fallet med läckström som hela konstruktionen behöver skyddas mot korrosion. I alla andra fall är det endast från en meter under grundvattenytan och uppåt som korrosionsskyddet måste förstärkas utöver det obligatoriska tillägget på 1 mm i rostmån, se tabell 8-4. I de fall ytterligare tillägg för rostmån är tillämpligt är detta sannolikt den enklaste åtgärden.

När det gäller förstärkt korrosionsskydd, förutom rostmån, är det viktigt att ha korrosionsorsaken klart för sig. Vi kan särskilja två huvudtyper, nämligen:

1. *Ökad risk för korrosion strax under grundvattenytan orsakad av att tillgången på oxidationsmedel är förhöjd i den luftade zonen*

Mängden tillgängligt oxidationsmedel i den övre zonen bestämmer hur kraftig korrosionen blir i den mest utsatta delen strax under grundvattenytan. Alla åtgärder som reducerar syretransporten till stålytorna ovanför grundvattenytan kommer att minska korrosionen i den mest utsatta zonen under grundvattenytan. Beläggningar, kringgjutningar o.s.v. behöver inte vara heltäckande, d.v.s. skador kan accepteras. Syftet med beläggningen är inte att skydda stålet i den luftade zonen mot korrosion, utan att minska katodytans storlek och därmed reducera korrosionen strax under grundvattenytan, den korrosion som orsakas av luftningscellen.

Följande åtgärder kan bli aktuella:

- plastbeläggning
- borrarade stålkärnepålar i foderrör
- kringgjutning efter prylning
- mantelinjektering av stålrörspålar
- gjutning av betongdäck över hela pålgruppen
- byte av jordmassorna till högresistivt material (grus, kross)
- katodiskt skydd.

För samtliga beläggningar och kringgjutningar räcker det att dessa vidtas på den del av pålen/sponten som sträcker sig från 1 m under grundvattenytan och uppåt. P.g.a. risken för läckströmspåverkan på andra konstruktioner i jorden bör inte katodiskt skydd installeras med mindre än att pålarna/sponten har någon form av ytbeläggning. Byte av jordmassor förutsätter att de nya massornas porvatten inte fylls med saltvatten från omgivningen.

2. *Ökad risk för korrosion i den luftade zonen orsakad av aggressiv jord eller fyllning*

Om jorden är kemiskt aggressiv avtar inte korrosionshastigheten med tiden. I detta fall ska skyddande beläggningar fungera som en barriär mellan stålet och den omgivande jorden. Samma åtgärder som i fall 1 kan tillämpas men kravet på en felfri beläggning är större. För att möjliggöra en kontroll av ytbeläggningens kvalitet efter slagning måste hela pålens yta ner till pålskon vara belagd, inte bara de övre delarna, se avsnitt 11.1.2.

10.1.3 Invändig korrosionsrisk

Som påtalats tidigare råder vitt skilda åsikter om vilken korrosion som är att förvänta på en rörpåles insida. VTT anser att den kan sättas till 0,2 mm/100 år, Pålkommisionen anger 1-1,5 mm/100 år och TRV (TRVK Bro 11) 2,0 mm/100 år. Denna fråga måste studeras närmare antingen experimentellt eller genom teoretiska beräkningar.

10.1.4 Åtgärder mot invändig korrosionsrisk

Antagandet att korrosionen på pålens insida är försumbar bygger på att, även om vatten tränger in via pålsko eller skarvhylsor, är tillförseln av syrgas så kraftigt begränsad tack vare långa diffusionsvägar att ingen mätbar korrosion sker. En bättre tätning vid skarvar och pålsko är därför en möjlig åtgärd.

Fyllning med betong är också en tillförlitlig metod.

Att tillföra en inhibitor eller ett syreförbrukande medel bedöms vara osäkert då mängden inträngande vatten inte kan förutses och ämnenas skyddsverkan ska säkerställas för >100 år.

Inte heller katodiskt skydd med hjälp av offeranoder bedöms tillräckligt tillförlitligt då vattenlinjens läge inte kan förutses och anoder bör vara lokaliserad i nivå med vattenlinjen eftersom det är där som den kraftigaste korrosionen förväntas. Man kan å andra sidan hävda att anoderna förbrukar syre och därmed minskar korrosionen även om den inte ger ett direkt katodiskt skydd i den mest utsatta punkten.

10.2 Konstruktioner i vatten

För att kunna göra en bedömning av korrosionsrisk och kunna välja rätt skyddsåtgärder krävs följande underlag:

- Placera vattnet i någon av kategorierna sötvatten, bräckt/saltvatten eller skiktat vatten.
- Fastställ nivån för medelhögvattenlinjen, medelvattenlinjen och medellågvattenlinjen.
- Om skiktat vatten, bedöm på vilken nivå språngskiktet normalt befinner sig.
- För bedömning av risken för mikrobiell korrosion bör provplåtar sättas ut, se avsnitt 11.2.2.
- Om tung sjötrafik planeras, uppskatta nivån för kraftigast propellerrörelser.
- I floder/älvar med strömmande vatten bör antalet dygn per år med förhöjt flöde uppskattas. Vidare bör en grov bedömning av representativ flödes hastighet under denna period göras.
- Nivån där högsta mekaniska belastning på konstruktionen kommer att uppstå ska beräknas.

10.2.1 Korrosionsrisk

Om hela konstruktionen befinner sig under vattenlinjen kan dimensionering ske genom tillägg för rostmån. I sötvatten är rostmån 3 mm/100 år och i bräckt/saltvatten är motsvarande värde 7,5 mm/100 år. I skiktat vatten bestäms rostmån av förväntad salthalt på den nivå där belastningen är som störst. Ligger språngskiktet under denna nivå d.v.s. vattnet förväntas ha låg salthalt under större delen av tiden kan rostmån sättas till 3 mm. Om språngskiktet ligger över nivån bör rostmån sättas till 7,5 mm. Vid stor omblandning eller stora variationer av språngskiktets läge sätts rostmån till 5 mm.

Om konstruktionen passerar genom vattenlinjen kommer pålen/sponten att perforeras i vattenlinjen innan 100-120 år passerat. Detta är oacceptabelt om konstruktionen är lastbärande men kan inte anses acceptabelt i andra fall heller eftersom hål i t.ex. en spont leder till att bakomliggande massor spolat ur. Korrosionen blir dubbelsidig och nedbrytningen accelereras. På dessa konstruktioner måste korrosionsskyddande åtgärder sättas in, antingen lokalt i vattenlinjen eller på hela konstruktionen. Om så görs kan tillägg med rostmån göras enligt ovan.

10.2.2 Exempel på åtgärder

Som framgick av föregående avsnitt krävs korrosionsskyddande åtgärder om konstruktionen passerar genom vattenlinjen. Antingen installeras lokala åtgärder i vattenlinjen eller så skyddas hela konstruktionen.

Följande lokala korrosionsskydd i vattenlinjen är tänkbara:

- nedgjutning av krönbalk på spontvägg
- vattenlinjeskydd med foderrör av PEH
- vattenlinjeskydd med foderrör av kolstål
- vattenlinjeskydd med svep av rostfritt stål
- påsvetsning av förstärkningsplåtar
- katodiskt skydd av vattenlinjen med påtryckt ström.

Målning eller annan beläggning med organiskt material bedöms inte kunna motstå nötning från is och kan därför inte fungera som ett tillfredställande lokalt skydd. Inte heller oorganiska beläggningar (zink eller aluminium) kan utnyttjas för lokalt skydd i vattenlinjen, se avsnitt 6.3.

Alternativet till ett lokalt skydd är att skydda hela konstruktionen. Om skyddet designas för konstruktionens hela livslängd krävs ingen ytterligare rostmån. Man kan också välja ett fullständigt skydd under en begränsad tid eller ett ofullständigt under hela eller större delen av livslängden. I båda fallen kan detta medföra en reducerad rostmån.

Följande metoder kan tillämpas för skydd av hela sponten/pålen:

- målning/ytbeläggning av hela konstruktionen i kombination med katodiskt skydd (påtryckt ström eller offeranoder)
- målning/ytbeläggning av zonen kring vattenlinjen i kombination med katodiskt skydd (påtryckt ström eller offeranoder)
- ingen ytbeläggning utan bara katodiskt skydd (påtryckt ström eller offeranoder).

För stora konstruktioner, som pålar eller spont, i vatten med låg salthalt (<0,5 %), där konstruktionen saknar ytbeläggning, bör inte ett fullständigt katodiskt skydd eftersträvas. Med offeranoder blir anodernas storlek/antal opraktiskt stor och med påtryckt ström blir risken för läckströmspåverkan på främmande konstruktioner svårhanterlig.

11. Kontroll

11.1 Jordinstallationer

11.1.1 Kontroll av korrosion

För pålar och spont slagna i jord finns inga andra möjligheter till kontroll av inträffade korrosionsangrepp än att dra upp desamma ur jorden och inspektera.

För att verifiera att ansatt rostmån varit rätt eller att vidtagen åtgärd fungerat är det lättaste förfarandet att en eller flera sonderingsstänger slås i anslutning till pålgruppen/spontväggen. Beroende på typ av åtgärd kopplas sonderingsstängerna ihop med övriga pålar eller inte. Efter lämplig tid dras sonderingsstången upp och korrosionshastigheten utvärderas per meter/delsång efter det att jord och korrosionsprodukter avlägsnats.

11.1.2 Kontroll av skador på ytbeläggning

En organisk ytbeläggning applicerad på delarna ovanför grundvattenytan reducerar kraften i luftningscellen och minskar därmed korrosionen strax under grundvattenytan. Längre ner är korrosionshastigheten låg och någon ytbeläggning behövs inte. Då man slår pålar/spont är det dock sällan känt hur många meter som behöver slås varför det är svårt att i förväg säga när det är dags att byta från obelagt till belagt stål. I praktiken väljer man sannolikt mellan helt obelagt eller helt belagt stål.

Det mest uppenbara sättet att kontrollera omfattningen av beläggningsskador är att dra upp en slagen påle och inspektera dess beläggning. Detta låter sig dock inte göras i någon större omfattning. Istället bör en provpåle slås, vissa elektriska mätningar utföras varefter pålen dras upp och inträffade skador korreleras med utförda mätningar. Övriga slagna pålar utsätts därefter för motsvarande elektriska mätningar och beläggningsskadornas omfattning utvärderas.

De mätningar som är aktuella att göra är:

- mätning av pålens övergångsmotstånd
- mätning av pålens strömbehov för att uppnå en viss skyddspotential
- mätning av gradienten i markytan närmast pålen.

Om vi tänker oss en väl syresatt zon ovanför grundvattenytan och en jord med både låg resistivitet och låg syresättning under grundvattenytan så kommer mätningarna att ge följande resultat:

- övergångsmotståndet styrs av arean skadad beläggning under grundvattenytan
- strömbehovet styrs av arean skadad beläggning ovanför grundvattenytan
- mätbara gradienter i markytan uppstår om skador finns i den övre zonen.

Utgående från dessa mätningar kan subjektivt tolkas om det finns skador i den kritiska zonen ovanför grundvattenlinjen eller inte. En inverkan är skarvhylsor. Dessa kommer att framträda som stora beläggningsskador varför deras läge i horisontell led måste dokumenteras vid slagningen.

11.1.3 Kontroll av skyddsverkan vid katodiskt skydd

Om konstruktionen förses med katodiskt skydd kan skyddsverkan kontrolleras genom potentialmätning. Dessa beskrivs i SS-EN 13509.

11.2 Vatteninstallationer

11.2.1 Kontroll av korrosion

Kontroll av korrosionens hastighet kan utföras på ett antal olika sätt, nämligen:

- remsor skärs ut och utvärderas på laboratorium
- tjockleksmätning med ultraljud
- exponering och utvärdering av provplåtar eller sonderingsstänger.

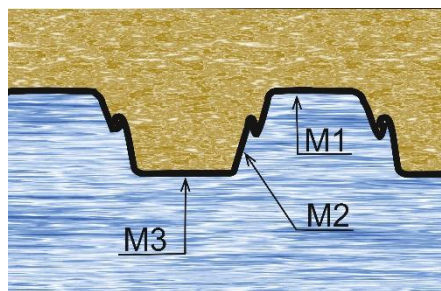
Ett exempel där man skurit ut en remsa i nivå med vattenlinjen visas i figur 11-1.



Figur 11-1. Utskuren remsa ur kajspont i Stockholm (foto H. Klingenberg)

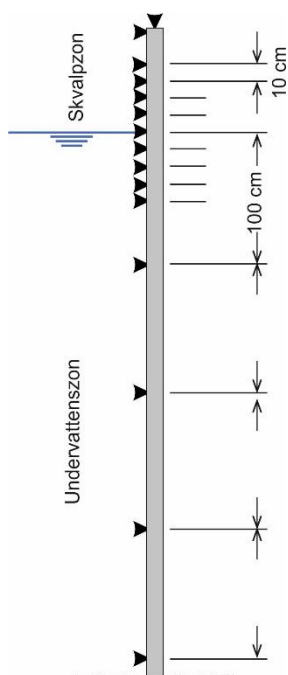
Resultatet är överskådligt och eventuella mätfel som kan uppstå vid direkt mätning på spont med dykare undviks. Metoden kan dock vara både kostsam och innebära en försvagning av konstruktionen då ytan ska återställas.

Mer förekommande är tjockleksmätning med ultraljud. På varje spontplanka bör mätning utföras på både spontens buk (M1) och dess liv (M2) samt dess rygg (M3), se figur 11-2.



Figur 11-2. Mätpunkter i horisontell led.

I vertikal led krävs mer tätt mellan mätpunkterna i den mest utsatta zonen kring vattenlinjen. Hein (1990) föreslår ett c/c på 10 cm, se figur 11-3 medan Houyoux (2007) anser att 20 cm är tillräckligt. Under denna zon kan avståndet mellan mätpunkter utökas till 1 m.



Figur 11-3. Mätpunkter i vertikal led (efter Hein 1990)

I varje mätpunkt bör sex registreringar av tjockleken göras längs en horisontell linje och med ett c/c på någon cm. Medelvärde av dessa utgör mätvärdet för punkten i fråga. För att få ett tillräckligt statistiskt underlag bör ett flertal spontplankor utvärderas.

Innan mätningen kan utföras måste stålytan rengöras från beväxning och korrosionsprodukter. Detta görs först med hammare sedan med sandblästring. Blästermunstycket omges av en huv, se figur 11-4. Ett alternativ till sandblästring är vattenblästring med högt tryck, med eller utan inblandning av sand.



Figur 11-4. Blästermunstycke men huv (Houyoux 2007)

Hur mätresultaten bör behandlas statistiskt har studerats av ett flertal bl.a. Alberts (1997), Houyoux (2007) och Svensson (2014).

Man måste vara medveten om att det finns en rad svårigheter i samband med ultraljudsmätningar och därmed en rad felkällor. Således kan dykarens sikt vara begränsad, hans möjlighet att hålla mätproben dikt an mot ytan kan försvåras av vågor eller strömmar. I många fall saknas uppgifter om byggnadsår eller aktuell spontprofil. Vidare tillverkas spont med en tolerans på ca 5 %. Slutligen påverkas mätresultat av stålytans ytjämnhet, speciellt frätgropar kan ge stor spridning i resultatet. Ljudets hastighet i stål är fyra gånger högre än i vatten. Om proben är av typen sändare/mottagare kan ojämnheter på ytan eller en vinkling av proben medföra att ett vattenlager mäts in i godstjockleken (0,25 mm vatten mäts då som 1 mm stål). Enligt Alberts (1997) finns dock prober av typen "chockvåg" där detta problem undviks.

Det tredje alternativet nämligen att exponera provplåtar eller sonderingsstänger har den fördelen att dessa kan utvärderas under kontrollerade förhållande på laboratorium. Provplåtar kan utnyttjas för att utvärdera korrosionshastigheten i undervattenszonen eller i bottensediment. I vattenlinjen uppstår dock missvisande resultat med mindre provplåtar eftersom luftningscellen har en större utbredning och den mest kritiska zonens läge varierar i tiden med vattenståndet. I detta fall bör en sonderingsstång vara ett bättre alternativ. De kraftigaste angreppen uppträder oftast på hörnet mellan spontliv och spontrygg, se figur 11-5.



Figur 11-5. Angrepp i hörn mellan spontliv och spontrygg (Braekell 2005).

Hörnets rundade form borde bli exponerad för motsvarande vattenrörelser (korrosionsmiljö) som en rund stång. Att montera en sonderingsstång längs med hela spontens längd och utvärdera denna efter ett antal år borde kunna ge en god uppfattning om spontens korrosionsstatus.

Ytterligare en faktor som måste beaktas är exponeringstiden. Under de första åren är korrosionshastigheten högre än längre fram i tiden. Hur stor skillnaden är varierar dessutom från zon till zon och med vattentyp. Under de första åren blir också de lokala skillnaderna större p.g.a. glödskalet. Korrosionen initieras i defekter i glödskalet. Ytor med intakt glödskaal fungerar under denna inledande period som katodytor. Frilagt stål i glödskaalsdefekter utgör anodytor och korrosionshastigheten blir här initialt hög delvis p.g.a. den galvaniska kopplingen till ytor med kvarvarande glödskaal. Med tiden sprider sig korrosionen och skillnaderna försvinner.

Om den ursprungliga godstjockleken inte är känd med stor noggrannhet kan det ta många år innan någon precision uppnås i utvärderingen av korrosionshastigheten med ultraljudsmätning (Wall 2011).

11.2.2 Kontroll av risk för mikrobiell korrosion

En bedömning av risken för mikrobiell korrosion kan göras, i ett projekteringsskede, på basis av vattenprover och prov på bottensediment. Säkerheten i bedömningen ökar dock om man samtidigt kan studera en stålyta som exponerats i vattnet/sedimenten (Hallbeck (2014).

Kontroll av mikrobiell aktivitet (görs av expertis inom mikrobiologi):

- Sätt ut provplåtar minst två år före byggstart.
- Utvärdera den mikrobiella aktiviteten.

Bestämning av initial korrosionshastighet (görs av expertis inom korrosion)

- Sätt ut provplåtar minst två år före byggstart.
- Utvärdera den initiala korrosionshastigheten.
- Utvärdera omfattningen av lokala angrepp
- Jämför uppmätt korrosionshastighet och omfattning av lokala angrepp med vad som är "normalt" för aktuell typ av vatten i initialskedet.

Om dessa tester visar på risk för framtida mikrobiell korrosion tas vattenprover på olika djup ända ner till botten. Om möjligt tas prov på sediment ända ner till ett djup då botten övergår till att bestå av oorganiskt material. Vid provtagning mäts direkt på platsen, pH, temperatur, redoxpotential och syrehalt i både vattenprov och prov av sediment. I vattnet mäts även konduktivitet. Prover som ska utsättas för kemisk analys måste antingen konserveras eller förvaras vid 0°C och analyseras inom 24 timmar. Mikrobiologiska prover måste prepareras på plats.

På laboratoriet utförs följande analyser.

Vatten:

- totala antalet bakterieceller
- koncentrationen av sulfat, organiskt kol och sulfid.

Sediment:

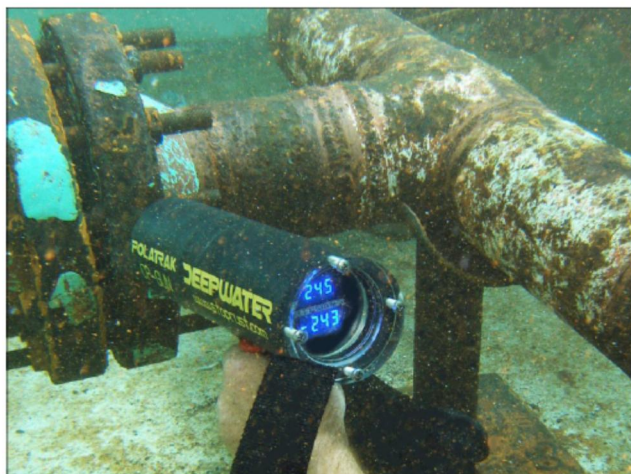
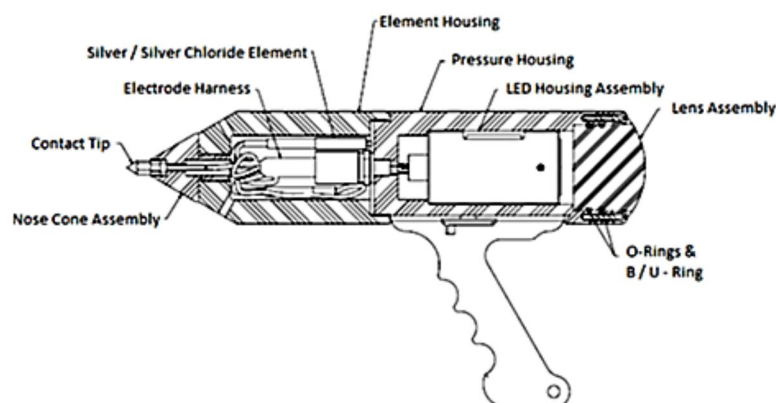
- antal sulfatreducerande bakterier (SRB) efter odling
- DNA analys av SRB, qPCR och "diversity"
- porvattnets innehåll av sulfat och organiskt kol
- innehåll av organisk kol i sedimentet
- vattenkvot.

11.2.3 Kontroll av skyddsverkan vid katodiskt skydd

Effektiviteten hos ett katodiskt skydd på en konstruktion i vatten kontrolleras genom potentialmätning. Vid mätningen utnyttjas en referenselektrod av typen Ag/AgCl/seawater. För fullständigt skydd krävs en negativare potential än -800 mV. Mätningen utförs med dykare som antingen håller en elektrod nära den punkt som ska mätas, se figur 11-6, eller så utnyttjas en CP-mätare, en potentialmätare med inbyggd referenselektrod som trycks mot ytan, se figur 11-7.



Figur 11-6. Utrustning för potentialmätning. Klämman fästs i sponten. Dykaren håller referenselektroden mot sponten och värdet läses av på voltmeteren av person på kajen.



Figur 11-7. Potentialmätning med en så kallad CP-mätare.

Om man har valt att installera ett ofullständigt skydd mäts en potential i intervallet mellan den oskyddade potentialen, ca -600 mV och kriteriet för fullständigt skydd, -800 mV. I detta fall bör potentialmätningen kompletteras med tjockleksmätning direkt på konstruktionen alternativt utvärdering av på platsen exponerade provplåtar.

12. Referenser

Alberts, D & Schuppener, B (1991): Comparison of ultrasonic probes for the measurement of the thickness of sheet-pile walls. Balkema. Rotterdam. ISBN 9054100257.

Alberts, D & Heeling, A (1997): Wanddickenmessung an korrodierten Stahlspundwänden- Statistische Datenauswertung zur Abschätzung der maximalen Abrostung. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau. Nr 75.

Atlas Steel Technical Note No. 7 "Galvanic Corrosion", August 2010.

Bengtsson, Å & Berglars, B & Hultsjö, S & Romell, J, (2000): Dimensioneringsanvisningar för slagna stålplåtar. Rapport 98. Pålkommisionen.

Bengtsson, P-E & Bergdahl, U & Camitz, G & Vinka, T-G, (2002): Statens Järnvägars undersökning av korrosion på stålplåtar i jord – Statistisk bearbetning. Information 2002:1. Pålkommisionen.

Bergdahl, U & Träng, R (2005): Korrosionsskyddande beläggningar på stålplåtar i jord - Provning av reptålighet. Varia 553. SGI. Linköping.

Breakell, JE et al (2005): Management of accelerated low water corrosion in Steel maritime structures. CIRIA C634. London.

Camitz, G & Vinka, T-G (1989): Corrosion of steel and metal-coated steel in Swedish soils – effects of soil parameters. ASTM STP 1013. 1989. P.37-53.

Camitz, G, (1994): Korrosion och korrosionsskydd av stålplåtar och stålspons i jord och vatten. Rapport 93. IVA Pålkommisionen.

Camitz, G & Bergdahl, U & Vinka, T-G, (2009): Stålplåtars beständighet mot korrosion i jord. En sammanställning av kunskaper och erfarenheter. Rapport 105. Pålkommisionen.

Dechema (1992): Corrosion Handbook, Corrosive agents and their interaction with materials, Vol 11. Berlin 1992.

Decker, J B & Rollins, K M & Ellsworth, J C (2008): Corrosion rate evaluation a prediction for piles based on long-term field performance. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 134, p. 341 - 351.

EAU 2004: Recommendations of the working Committee Embankment, Harbours and Waterways, 8th edition, Ernst & Sohn. Berlin 2006, ISBN-13: 978-3-433-01666-4, ISBN-10:3-433-01666-6.

EN-ISO 12944: Färg och lack – Korrosionsskydd av stålkonstruktioner genom målning. 1998.

Engblom (2014). Pågående examensarbete vid Swerea KIMAB. Litteraturstudie och utvärdering av stålplåtar efter 35 års exponering i jord.

Enning, D & Venzlaff, H & Garrelfs, J & Dinh, HT & Meyer, V & Mayrhofer, K & Hassel AW & Stratmann, M & Widdel, F, Marine sulfate-reducing bacteria cause serious corrosion of iron under electroconductive biogenic mineral crust, Environmental Microbiology (2012) 14(7),1772-87 doi: 10.1111/j.1462-2920.2012.02778.x.

Enning, D & Garrelfs, J (2014): Corrosion of iron by sulfate-reducing bacteria: new views of an old problem. Appl. Environ. Microbiol. 80(4). 1226-1236.

Eistrat, K & Thoren, A (1980): Mikrobiell korrosion – en översikt. KI Rapport 1980:9.

Eriksson, K & Mattsson, L-E & Klingenberg, H & Wannerberg, C (1985): Skador i konstruktioner i svenska sjöfartsanläggningar beroende på den marina miljön. BFR-Rapport R54:1985. Bygghöfveringsrådet, Stockholm 1985.

Fischer, K.P & Bente, B (1981): Corrosion and corrosivity of steel in Norwegian marine sediments. Underground Corrosion, ASTM STP 741. 1981.

Girna, G (1973): Konstruktion, Korrosion und Korrosionsschutz unterirdischer Stahltragwerke – Spundwände, Tubbing, Bleche. Band 14. Dusseldorf. 1973.

Hallbeck, L & Pedersen, K (2014): Sundsvallsbron. Measurement and evaluation of microbially influenced corrosion rates on piles and other test materials. Microbial Analytics. 2014-04-15.

Havnekorrosionsudvalget. Meddelande nr.4. Maj 1963. Köpenhamn.

Hein, W (1990): Zur korrosion für Stahlspundwänden in wasser. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau (1990) nr 67.

Houyoux, C (2007): Design method for steel structures in marine environment including the corrosion behaviour. EUR 22433.

Intertek CAPICS (2011): Assessment of steel pile corrosion: Sundsvall bridge DB9880-01. 2011-08-19.

Intertek CAPICS (2013): Analytic report DB9880-2556. 2013-01-17.

Johnsson, T & Sederholm, B (1990): Korrosionsskydd av vägtrummar. Resultat efter fyra års exponering på försöksstationer. Korrosionsinstitutet. Stockholm. 1990-11-18.

Li, S Y & Kim, Y G & Jeon, K S & Kho, Y T & Kang, T (2001): Microbiologically influenced corrosion of carbon steel exposed to anaerobic soil. Corrosion, vol. 57, p. 815 - 828.

Mattsson, E & Kucera, V, (2009): Elektrokemi och korrosionslära. Swerea KIMAB, Stockholm. 194 sidor.

Norin, M & Vinka, T-G (2003), Korrosion på kolstål och zink i fyllnadsjord i stadsmiljö, KI-rapport 2003:5, Korrosionsinstitutet, Stockholm 2003.

Ohsaki, Y, (1982): Corrosion of steel piles driven in soil deposits. Soils and Foundations, vol. 22, no 3, p. 57 - 76.

Paik, J K & Melcher, R E (2008): Condition assessment of aged structures. Woodhead publishing limited. 2008.

Pianc (2005): Inspection, maintenance and repair of maritime structures exposed to damage and material degradation caused by salt water environment. PIANC Report, Working group 17-2004.

Pedersen, K (2014a): Undersökning och bedömning av risker för mikrobiellt accelererad korrosion av Sundsvallsbrons brostöd i botten sedimenten. Microbial Analytics 2014-11-10.

Pedersen, K (2014b): Investigation of microbially induced corrosion of the steel pile cofferdams under the bridge over the Sundsvall fjord. Microbial Analytics 2014-12-01.

Romanoff, M (1962): Corrosion of steel pilings in soil. NBS Monograph 58. U.S. Department of commerce. National Bureau of standards. Washington. 1962.

Romanoff, M (1969): Corrosion evaluation of steel test piles exposed to permafrost soils. Paper no. 81. Proc. 25th NACE Conference. March 1969.

- Ruukki (2013): Ruukki stålörspålar. Anvisningar för projektering och installation. Ruukki stålörspålar.
- Sandberg, B, Klingenberg, H (2002): Cathodic protection of steel sheet pilings in brackish water. ALWC Corrosion Conference, Denmark.
- Sandberg, B (2012): How to counteract MIC in bottom mud. Föredrag vid Ramnäs kunddaggar 2012.
- Sandberg, B (2014a): Katodiskt skydd av underbyggnad till brostöd för Sundsvallsbron. Swerea KIMAB rapport 11659/2. 2014-10-30.
- Sandberg, B (2014b): Granskning av design för katodiskt skydd av underbyggnad till brostöd för Sundsvallsbron. Swerea KIMAB rapport 11659/3. 2014-11-23.
- Sandegren, E, (1988): Korrosion på stål – vertikalt orienterat – i jord. Slutrapport. Meddelande nr 46. Statens järnvägars huvudkontor, Geoteknik och ingenjörsgologi, Stockholm.
- Sederholm, B & Svensson, T & Vinka, T-G, (1992): Korrosion på metaller i jordar med olika surhetsgrad och vattenhalt. Rapport R7:1992. Bygghörskningsrådet, Stockholm.
- Slunder, Boyd, "Zinc: Its corrosion resistance", second edition, International Lead Zinc Research Organization, August 1983.
- Smith, J.S & Miller, J.D.A (1975): Nature of Sulphides and their Corrosive effect on Ferrous Metals: A Review. Br. Journal, 1975, vol. 10, No 3.
- SS-EN 12473. Katodiskt skydd i havsvatten – Allmänna regler. 2014.
- SS-EN 12954: Katodiskt skydd av metalliska konstruktioner i jord eller vatten – Allmänna principer och tillämpningar på rörledningar. 2001.
- SS-EN 13509: Mätmetoder vid katodiskt skydd. 2003.
- SS-EN 50162. Skydd mot korrosion orsakad av läckströmmar från likströmssystem.
- SS-EN 1993-5:2007. Eurokod 3: Dimensionering av stålkonstruktioner – Del 5: Pålar och spont. Utgåva 1, SIS, Stockholm.
- Svensson, T & Thelandersson, S & Rosell, E & Wallin, P & Harryson, P (2014): Sundsvallsbron. Final report for task force group 2 – Measurement and Evaluation of Corrosion Rate. Trafikverket 22-1224-1-14-1006. 2014-06-24.
- Task Force Group 1– Corrosion (2012): Bro över Sundsvallsfjärden. Durability of Sheet Piles in Pier Foundations. 24-05-2012.
- Troselius, L (1991): Korrosionsrisker under mark – stagförankringar i ställverk och spont i dammar. Föredrag vid Korrosionsinstitutets konferens Korrosionsskydd av vattenkraftverk. 9-10 April 1991.
- TRVK Bro 11. Trafikverkets tekniska krav Bro. Publikation 2011:085.
- Tungesvik, K & Moum, J & Fischer, K.P (1975): Investigations of corrosion rates on steel piles in Norwegian marine sediments. 7th Scandinavian Corrosion Congress, Trondheim 1975.
- Törnqvist, J (2004): Korrosion på stålörspålar. Dimensionering utgående från empiriskt material. VTT Bygg och transport. Espo, Finland, oktober 2004.
- Uhlig (2011): Uhlig's Corrosion Handbook. 3rd edition. Jogn Wiley & Sons, Inc., publication.

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

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

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

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

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

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

Vinka, T-G & Camitz, G & Linder, H (2007): Korrosion på vertikala stålstänger i jord med olika vattenhalt – laboratorieundersökningar med luftningsceller och galvanisk korrosion. Opublicerad.

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

Vinka, T-G & Bergdahl, U & Camitz, G & Bendz, D (2011b): Korrosion på neddrivna stålplåtar exponerade i naturliga svenska icke omgrävda jordar. Rapport under publicering.

Vinka, T-G (2014a): Korrosion i bräckt vatten. Swerea KIMAB Rapport 2014-126, Swerea KIMAB dec 2014.

Vinka, T-G (2014b): Korrosion på kolstål, förzinkat stål och zink i jord – långtidsundersökning, KIMAB 2014-128, Rapport under publicering (Svenskt Vatten Utveckling).

Wall, H & Wadsö, L (2011); Sheet Pile Corrosion in Swedish Harbours – An Inventory of Corrosion Surveys along Swedish Coast, Proceedings of Eurocorr 2011, Stockholm.

Wall, H (2014), "Service life assessment of harbor structures – Case studies of chloride ingress into concrete structures and sheet piling corrosion rates", doktorsavhandling, Lunds Tekniska Högskola, 2014.

Wijngaard, B.H (1982): Spundwandkorrosion in Seewasser. Stahl und Eisen 102 (1982) Nr 11, s 583/584.

Zen, K (1974): Submerged marine structures – Corrosion Survey and Corrosion Protection. Kajima Shuppan Kai. Tokyo Japan.

