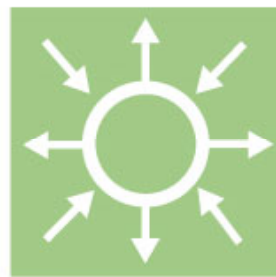
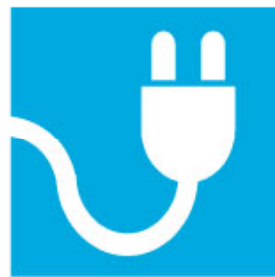
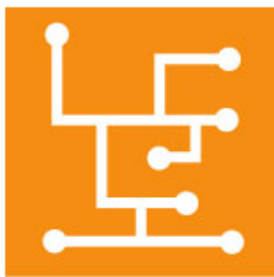
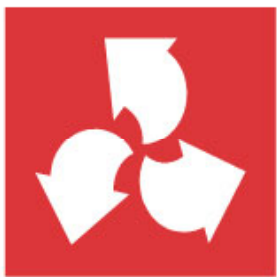




Alternativ till koppar i mark- förlagda jordningslinor

Litteraturgranskning

Elforsk rapport 07:55



Lena Sjögren, Kaija Eistrat

Januari 2008

ELFORSK

Alternativ till koppar i mark- förlagda jordningslinor

Litteraturgenomgång

Elforsk rapport 07:55

Förord

Orsaken till att projektet fått aktualitet är det höga kopparpriset på världsmarknaden. Jordningslinor blir dyrare att använda. Dessutom har bland annat jordningslinor blivit mål för kopparstölder på grund av det höga skrotpriset på metallen. Intresset i branschen har därför ökat för att finna andra material på marknaden som skulle kunna fungera lika bra som dagens jordningslinor av koppar.

Rapporten 07:55 är ett projektresultat av det samlade ramprogrammet för Underhåll, Diagnostik och Reinvesteringsstrategi som startades under 2005. Programmet pågår under tre år.

Målsättningen med ramprogrammet är att:

- identifiera utvecklingsinsatser för det strategiska reinvesterings- och underhållsarbetet som kan leda till förbättrad nätekonomi, samt att medverka till att dessa genomförs
- öka kunskapen om nya möjligheter med diagnostiska metoder för underhåll av elnät
- skapa möjligheter till att förbättra underhållets styrning och planering
- sprida kunskap med syfte att höja kompetensnivån inom området
- vara en brygga mellan högskoleforskningens resultat och branschens möjliga applikationer

Ramprogrammet syftar till att vara användarorienterat med tillämpade inriktningar. Avsikten är att resultaten i huvudsak skall kunna tillämpas direkt i verksamheten.

De finansierande företagen i ramprogrammet är följande:

Borlänge Energi AB	Mälarenergi Elnät AB
Borås Energi Nät AB	Mölnadal Energi Elnät AB
Energiverken i Halmstad Elnät AB	Nacka Energi AB
E.ON Elnät Sverige AB	Sundsvall Elnät AB
Eskilstuna Energi & Miljö AB	Svenska Kraftnät
Göteborg Energi AB	Vattenfall Eldistribution AB
Jämtkraft Elnät AB	Öresundskraft AB
Jönköping Energi Nät AB	

Ramprogrammets styrgrupp består av följande personer:

Sverker Ekehage Vattenfall Eldistribution AB
 Peter Hjalmar E.ON Elnät Sverige AB
 Lennart Karlsson Göteborg Energi Nät AB
 Per Kvarnefalk Svenska Kraftnät

Programansvarig är:

Sven Jansson Elforsk AB

Sven Jansson

Elforsk AB

Programområde Överföring & Distribution

Sammanfattning

Jordningslinor (marklinor) används förhållandevis sällan internationellt. Därmed finns få publicerade uppgifter om materialutveckling specifikt för linor. Den vanligaste formen för jordelektroder allmänt är jordspett.

Koppar dominerar som material för jordelektroder, i Sverige och internationellt. Obelagt kolstål används i bl.a. Kina och Indien, främst med hänvisning till det höga priset på koppar. Kopparbelagt stål, förzinkat kolstål, och obelagt kolstål anges som alternativa material till koppar för jordningslinor i SS-EN 50314. Förzinkade ställinor har tidigare installerats i Sverige. Kopparbelagt stål används till viss del. Många föreskrifter anger explicit att aluminium inte skall användas i kontakt med jord i jordningssystemet. Aluminiumlina med stålkärna installerades dock av Electricity Supply Board (ESB) i Irland på 1980-talet, med förväntad livstid av minst 20 år.

Två större korrosionsundersökningar av alternativ till koppar för jordning har gjorts: i USA 1962 – 1969 (fältexponering upp till 7 år) och Tyskland (laboratorie- och fältundersökningar; 1979 – 1981). Undersökningarna avsåg i första hand material för jordspett, och motiverades av risken för galvaniska problem i samband med jordning med koppar. Granskade material var koppar med olika beläggningar (zink, tenn, bly), förzinkat kolstål, kopparbelagt kolstål, kolstål med beläggning av rostfritt stål (302), rostfritt stål typ 304, kiseljärn, NiResist (16-32 % Ni), zink, bly, magnesium, aluminium.

Allmänna undersökningar av metallers korrosion i jord baseras i regel på exponeringar av plåtar. Vid tillämpning av resultaten för jordningslina måste bland annat risken för galvanisk korrosion vid kontakt med andra konstruktioner (inverkan av galvaniska kopplingar), utformningen som kabel (t.ex. spalter), inverkan av läckströmmar och inducerad ström, ev. extra övergångsmotstånd p.g.a. korrosionsprodukter, konsekvenser av olika korrosionsformer, som lokal korrosion och korrosion i skador hos en ädlare ytbeläggning, också bedömas.

Sammanfattningsvis så har inget enskilt material för jordningslinor påträffats, som i samtliga aktuella miljöer direkt kan ersätta koppar med bibehållen livslängd, i många fall onödigt lång. Höglegerade rostfria stål kan vara ett ur korrosionssynpunkt möjligen likvärdigt alternativ till koppar, som dock p.g.a. priset även det kan bli utsatt för stöld. Med klarläggande av korrosionsrisker och inverkan av korrosionsangrepp på funktionen, kan även material med mindre korrosionshårdighet än koppar användas, i första hand rekommenderas en översiktlig bedömning av livslängd i aktuella jordmiljöerna för förzinkat stål, ev. med lokala offeranoder i speciellt utsatta områden. Andra möjliga alternativ värda att undersöka är aluminerat stål och förtent stål.

Summary

The main material for earth electrodes is copper, in Sweden and internationally. Bare carbon steel is used to some extent e.g. in China and India mainly due to the high price of copper. European standard EN 50341 lists copper, lead sheathed steel and tinned or lead sheathed copper as materials for earth electrodes. The national Swedish part A-Dev SE-1 of SS EN 50341 has copper, copper clad carbon steel, zinc coated carbon steel and bare carbon steel. According to many regulations, aluminium is explicitly excluded from use in contact with soil. Despite this aluminium wire with a steel wire core was installed by the Electricity Supply Board (ESB) in Ireland in the 1980's, with a life expectancy of at least 20 years.

Ground rod is the most widely used type of earth electrode. Buried continuous earth wire or counterpoise electrode is fairly uncommon internationally so materials information specifically for wires is scarce.

Major corrosion investigations of alternatives to copper as grounding material were made in USA 1962 – 1969 (field exposures for up to 7 years) and in Germany 1979 – 1981 (laboratory and field investigations). Materials primarily for ground rods were investigated. Both projects were motivated by problems with galvanic interactions from bare copper grounding systems. Copper with a coating of zinc, tin or lead, zinc-coated carbon steel, copper clad or stainless steel clad carbon steel, type 304 stainless steel, silicon iron, NiResist (16 – 32 % Ni), zinc, aluminium, magnesium and lead were included.

Corrosion properties in soils, mechanical properties, price and availability are generally the main factors in choice of ground electrode material. The electrical conductivity of candidate alloys varies but is considered sufficient for all metals. Properties of accumulated corrosion products at the metal / soil interface may have a greater individual influence on the total resistance.

Fairly extensive corrosion data from field exposures of metals in soils are available. Some considerations, on applying the results for grounding wires, are i.a. effects of bimetallic couplings, corrosion from leakage current (induced current), consequences of different forms of corrosion attack on wires (local attack, crevice corrosion on stranded wires), possible effects of corrosion products on the wire/soil resistance. The propensity for localised corrosion may be a problem with non-copper alloy groups with a generally good corrosion resistance in soils, e.g. stainless steels, aluminium. If a composite material with a nobler coating is used, such as copper on steel, integrity of the coating in production and handling must be ensured.

To conclude, the survey has not identified any single material, with the potential to replace copper as continuous counterpoise (earth electrode) in all soil environments. Highly stainless steels may be alternative materials, with corrosion properties equivalent to those of copper. They may however also attract theft. Less corrosion resistant materials may be successfully used, with proper regard to corrosion risks and specific consequences of corrosion on functions. It is recommended to conduct a survey of projected lifetime for zinc-coated steel at relevant sites, including the need of sacrificial anodes in particularly corrosive areas. Other materials considered worth investigating are aluminium coated steel and tin coated steel.

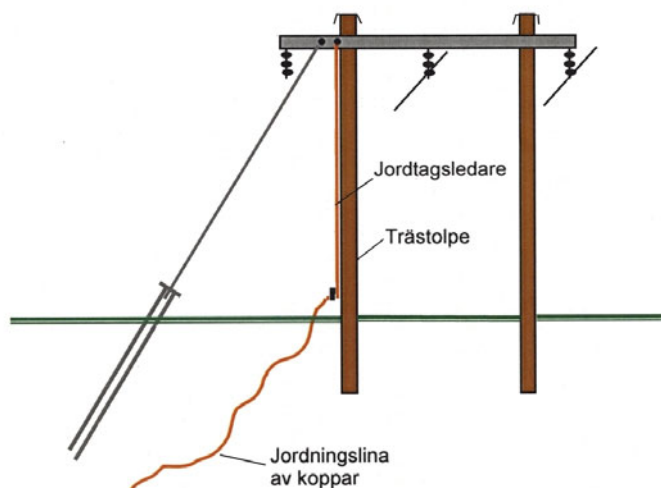
Innehåll

1	Bakgrund	1
2	Underlag	2
3	Teknisk bakgrund	3
3.1	Föreskrifter för jordning	3
3.2	Jordningssystem	4
3.3	Jordningslinor	5
4	Översikt av material för jordelektroder	7
4.1	Normer och föreskrifter	7
4.2	Sammanställning av förekommande material	9
4.2.1	Jordelektroder och jordningssystem: kommersiella leverantörer	12
5	Korrosion på jordelektroder	14
5.1	Allmänt	14
5.2	Galvanisk korrosion	15
5.3	Makroceller	16
5.4	Växelströmskorrosion	17
6	Material för jordelektroder: korrosion i jord	18
6.1	Korrosion av metaller i jord	18
6.1.1	Koppar	20
6.1.2	Kolstål	21
6.1.3	Andra legerade stål	21
6.1.4	Rostfria stål	21
6.1.5	Aluminium	22
6.1.6	Övriga metaller (bly, tenn, zink)	22
6.1.7	Ytbelagda metaller	22
6.2	Plåt exponeringar: relevans för jordningslinor	23
6.3	Svenska jordars korrosivitet	23
7	Jordelektroder: undersökningar och erfarenheter av korrosion	25
7.1	Fält exponeringar och laboratorieundersökningar	25
7.1.1	NACE - NCEL	25
7.1.2	National Electrical Grounding Research Project	27
7.1.3	EPRI	27
7.1.4	G. Heim (Tyskland)	28
7.2	Praktikfall	28
8	Diskussion	31
9	Slutsatser	33
10	Referenser	35
	Bilaga 1	41

1 Bakgrund

Det har under senare tid blivit allt vanligare att jordningslinor av koppar stjäls genom att de dras upp ur jorden. Förutom ekonomisk skada utgör detta en säkerhetsrisk. Den höga stöldrisken, orsakad av ett högt kopparpris, motiverar ett ökat intresse på senare tid för alternativa material.

Av alternativa material krävs, förutom begränsad stöldbegärlighet, acceptabla elektriska egenskaper (strömtålighet, ledningsförmåga, övergångsmotstånd till jord, kontaktegenskaper för anslutning till stolpe), tillräcklig mekanisk hållfasthet samt korrosionsegenskaper som även efter längre tid i jord garanterar övriga egenskaper. Hänsyn behöver tas även till miljöpåverkan, återvinningssamöjligheter och totalkostnad.



Figur 1 Trästolpe med jordningslina (foto M. Forssander)

2 Underlag

Rapporten bygger på genomgång av litteratur, information på Internet och information från aktörer inom området. Insamlad information avser material som förekommer och tänkbara nya material, med tyngdpunkt på korrosionsaspekter.

Litteratur har sökts dels genom bibliografiska databaser, dels direkt i vissa samlingar, främst NACEs korrosionskonferenser. En sökning efter eventuella tidigare (1950-1960-tal) provade legeringar har gjorts manuellt. Vidare har material från G. Camitz, Korrosionsinstitutet, om jordning sammanställt ca 1980 - 1990 granskats. Även patentdatabaser har sökts m a p material för jordningslinor och jordelektroder för jordning av kraftnät.

Litteraturdatabaser som använts har varit: Inspec, Compendex (Engineering Index), IEEE, CSA Technology Cluster med bl.a. Metadex, Aluminium Abstracts, Copper Database, Corrosion Abstracts

Relativt få publikationer har återfunnits om korrosion på jordtag och jordtagsmaterial för kraftledningar och praktiskt taget inga specifikt om korrosion och materialval för jordningslinor.

I rapporten används begreppen enligt följande

Jordelektrod	ledaren i kontakt med jorden; inkluderar alla slags yt- och djupjordelektroder: jordspett, lina, plåt, band, armering
Jordtag	den enskilda jordningspunkten: jordelektroden, ev. ledare från objektet som jordas, anslutningar. Djup- och yttjordtag finns
Jordningssystem	en anläggnings hela jordning: jordtag och ev. förbindelser
Jordningslina	yttjordledare i form av lina (flera kardeler) eller tråd (en ledare), horisontellt i marken
Yttjordledare	lina, tråd, band horisontellt utlagd i marken
Djupjordledare	jordspett, plåt vertikalt neddrivna i jord

3 Teknisk bakgrund

I anslutning till kraftnät i Sverige finns i storleksordningen något hundratal mil jordningslinor, dels som linor som följer ledningens sträckning, dels som slingor som lagts som punktförstärkning av jordningen vid vissa stolpar. Tidigare har varmförzinkad ståltråd använts (1930-talet). På grund av korrosionsskador har den förzinkade ståltråden i stor utsträckning bytts mot kopparlinor, i en del fall mot förkopprad ståltråd.

Ledningssträckningarna går till stor del i moränjordar med låg ledningsförmåga.

Koppar fungerar tekniskt utmärkt som jordningsmaterial såväl elektriskt som ur korrosionssynpunkt. Det övervägande valet av koppar till jordning kan i någon mån bero på slentrian: ledningsförmågan hos många andra metaller är tillfredsställande, och deras korrosionshårdighet i många jordmiljöer kan vara tillräcklig, medan även koppar kan korrodera i vissa jordar.

Väl kända problem med kopparjordning, bland annat i USA och Tyskland, orsakas av att koppar är klart katodisk i förhållande till konstruktionsmaterial som stål och förzinkat stål med galvaniska effekter på närliggande konstruktioner som följd: 1) risk för galvaniska korrosionsskador 2) kraftigt ökat strömbehov i katodiska skydd. Sådana galvaniska korrosionsproblem mellan olika jordförlagda konstruktioner har varit mindre vanliga i Sverige bland annat då kraftledningarna i stor utsträckning går genom glest bebyggda områden med mindre risk för sammankoppling.

3.1 Föreskrifter för jordning

Som allmän föreskrift för jordning vid kraftöverföring gäller avsnitt 6. Earthing systems, i SS-EN 50341 (1) och Elsäkerhetsverkets starkströmsföreskrifter, Elsäk FS 1999:5 (3).

Anvisningar för jordning i svenska kraftnät finns vidare i avsnittet Jordningar i Tekniska riktlinjer för 400 kV och 220 kV ledningar, SvK TR5:113 (2).

Nationella föreskrifter för jordning av elektriska nät finns i de flesta stater, eftersom det i hög grad berör nätens funktion och säkerhet. National Electric Code, NEC (8) är övergripande föreskrift i USA. Utförliga normer och anvisningar för bland annat kraftindustrin som också används utanför USA finns från Electric Power Research Institute (EPRI), USA, och Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), USA (7), (9), (10).

3.2 Jordningssystem

Några allmänna verk om jordning utöver de ovan nämnda föreskrifterna finns i referensdelen avsnitt 0, referens (6) och (11).

Jordningssystemet omfattar funktionsjordning - avledning av blixtrömmar och felströmmar för att skydda anläggningen, och skyddsjordning - begränsning av steg- och beröringsspänning

Jordtaget består i princip av en jordelektrod i direkt kontakt med jord och ledningar från det jordade föremålet till jordelektroden. Funktionsjordning utförs som djupjordtag - rör, stång eller vinkelstång, eller som ytjordtag - stråljordtag, jordningslina (marklina).

Som allmänna krav på jordningssystemet anger SS EN 50341 (1) att systemet skall försäkra tillräcklig mekanisk hållfasthet och korrosionsresistans, tåla högsta felström (teoretiskt framtagna) samt skydda utrustning och personer från farliga spänningar. SS-EN 50341 (1) anger samband för beräkning av maximal strömtäthet för olika material och temperatur. I Tabell 1 återges maximal strömtäthet för olika material enligt Svenska Kraftnätets krav.



Figur 2 Stålstolpe med ansluten jordningslina och markprofil samt närbild av jordningslina. (Foto M Forssander)

Tabell 1 Maximala strömtätheter för jordledare vid maximal jordslutningsström, enligt Svenska Kraftnäts Tekniska riktlinjer, SvK TR 5:113, Jordningar.

Material	Tillåten strömtäthet vid 1 s (A/mm ²)
Stål	65
Koppar	200
Kopparbelagt stål	130
Aluminium	130
Aluminiumbelagt stål	85

Kontinuerlig jordningslina som jordelektrod används vid kraftledning främst i Skandinavien, Canada och Australien. I många andra länder, t ex USA, görs jordningen företrädesvis som djupjordning genom jordspett ('ground rods') eller nergrävda jordningsplåtar. Jordningslina väljs främst då jorddjupet inte är tillräckligt för djupjordtag (spett, plåtar). Jordtagen kan vara utplacerade i geometriskt olika positioner omkring föremålet som jordas: som enskilda punktjordtag, sammanbundna i cirkel, stjärnform eller rutnät ('grid') omkring objektet osv.

Även andra jordförlagda metallstrukturer som t ex vattenledningar och armering har utnyttjats som jordtag, främst vid jordning av strömförande system för byggnader.

Såväl i Sverige som utomlands används i huvudsak koppar för jordelektroder. Även kopparbelagt stål förekommer och blir allt vanligare. I bl.a. USA och Tyskland har risken för galvanisk korrosion på närliggande konstruktioner varit ett motiv för att propagera för användning av andra material än koppar i jordtaget (12), (14), (16), (18), (21), (25), (45), (48), (50). Förzinkat stål föreslås i regel som huvudalternativ även om koppar fortfarande dominerar. Förzinkat stål har i Sverige ansetts osäkrare då zinken kan korrodera förhållandevis snabbt i vissa jordar.

Livslängden för jordningssystemet har av Svenska kraftnät 2005 bedömts vara 45 år (51).

3.3 Jordningslinor

Jordningslinan ska enligt Svenska Kraftnäts föreskrifter i SvK TR:5-113 (2) förläggas på minst 60 cm djupt, minst 80 cm i ängs- och åkermark. Där jorddjupet inte räcker får linan gå ytligare. På berg i dagen kan den dras på ytan, men ska då täckas med bräder eller dylikt och sten, jord eller liknande. Både fastsättningen och den varierande korrosionsmiljön längs trådens sträckning kan påverka dess korrosion.

Jordningslinans utformning, trådtjocklek och andra parametrar förskrivs i standarder och andra föreskrifter. Bakgrunden till angivna krav är inte känd; antas till stor del bero på hållfasthet och korrosionsegenskaper (11), (50). Ett grundläggande krav är dock att linan klarar maximalt tänkbara felströmmar, jämför strömtäthetskraven i Tabell 1 ovan, samt att tillräcklig potentialutjämning i jorden erhålls. Det senare styrs främst av jordningssystemets konstruktion och övergångsmotståndet mot jord.

Övergångsmotståndet mellan en långsträckt jordelektrod och jord beräknas enligt $R = \frac{\rho}{2\pi \cdot l} \ln\left(\frac{l^2}{td}\right)$, där ρ = jordresistiviteten. l = linans längd, d = linans diameter, t = djup under markyta (1). Övergångsmotståndet mot jord bestäms således till stor del av jordens resistivitet, jämför Tabell 2.

Tabell 2 Resistivitet i jord och andra medier, efter A. Gabbauer, Diplomarbeit, Graz, 2001 (41)

Jordart/jordtyp	Resistivitet (Ωm)
torv, mossjord	5-40
lera, humus	20-200
sand	200-2500
grus	500-3000

En jordningslina av koppar består, i Svenska Kraftnäts anläggningar, i allmänhet av flera trådar, kardeler. Linans tvärsnitt är vanligen 50 (koppar), 52 (stål), 70 eller 120 mm². I en 52 mm² 7-trådig lina har då varje deltråd en tvärsnittsarea av ca 7,1 mm² och en diameter av ca 5,8 mm (53).

Anslutning och skarvning under markytan kan ske med skruvförbindning, kontaktpressning, svetsning eller vridskarvrör (SvK TR 5:113, (2)). Göteborg Energi kräver kontaktpressning med C-klämma (skruvförband med s.l. primärmodulklämma accepteras inte), (54).

Den markförlagda jordlinan går upp till stolpen och ansluts där, i allmänhet med skruvförband eller via kabelsko med kontaktpressad lina (klämförband). Zonen omkring markytan (markbandet) bör särskilt uppmärksammas med avseende på korrosion, se Figur 2.

Kontroll av utlagda jordningslinors tillstånd är förhållandevis besvärlig, se t ex Peterson & Björn, 2001 (39). Jordtag vid stationer med systemspänning över 100 kV ska kontrolleras vart 8e år (12 år för jordningslinor av koppar) enligt Starkströmsföreskrifterna (3). Under mellantiden innebär skador, till exempel avfrätning genom lokal korrosion en skaderisk.

4 Översikt av material för jordelektroder

4.1 Normer och föreskrifter

I Tab G.1 i SS-EN 50341 (1) anges material och minimidimensioner för jordelektroder av olika former. Uppräknade material omfattar stål (kolstål) med olika beläggningar - zink (varmförzinkning), bly, koppar - samt koppar, bar eller med beläggning av tenn, zink eller bly.

Specifikt för ytjordelektroder (jordningslina, band, tråd) anges som material stål med blybeläggning, bar koppar, och koppar med tenn- eller blybeläggning. I den i sektion 6.2.2.1 inarbetade nationella svenska föreskriften för jordelektroder anges som material för lina koppar, obelagt kolstål och stål med kopparbeläggning.

I texten i avsnitt 6.2.2.1 noteras dock också att *'if a different material [d.v.s. inte uppräknad i tabellen G.2], for example stainless steel, is used, this material and its dimensions shall meet the requirements in 6.2.1'*, där kravet i 6.2.1 är att materialen ska vara tillfredställande korrosionshårdiga i jord, och ha tillräcklig mekanisk hållfasthet under installation och användning.

Tabell 3 visar en sammanställning av gällande material för jordningslinor och andra typer av ytjordelektroder från sex normer och föreskrifter: SS-EN 50341 och den nationella svenska delen i SS-EN 50341 (1), Elsäkerhetsverkets starkströmföreskrifter (3), Svenska Kraftnäts föreskrift för jordning (2), tysk standard DIN VDE 0151 (4) och prEN 50114 (förarbete till Europastandard) (5). I Bilaga 1 finns en mera fullständig sammanställning, med dimensioner för olika typer av ytjordelektroder.

Tabell 3 Material för jordelektroder angivna i standarder

Standard	Koppar	Koppar, tennbelagd	Koppar, zinkbelagd	Kolstål, obelagt	Kolstål, förzinkat	Kolstål, kopparbelagt	Kolstål, blybelagt	Rostfritt stål
SS EN 50341 tab G1	+ Lina	+ Lina	+ Band	-	+ Tråd Band	-	+ Lina	- ²
SS EN 50341/ SE1	+ Lina	-	-	+ Lina		-		- ²
SvK TR 5:113	+ Lina	-	-	-		+ Lina		-
FS 1999:5, B75	+ Lina	-	-	- ?	+ Lina	+ Lina Tråd		-
DIN VDE 0151	+ Lina Tråd Band	+ Tråd	+ Band	+ Tråd ¹	-	-		+ Tråd Band
prEN 50114 Tab 1	+ Lina Tråd Band	+ Lina	+ Band	- Band	-	-		- ³

¹ Endast inbäddad i betong² Rostfritt stål nämns i texten som exempel på alternativt material förutsatt att kraven i normen uppfylls³ Lämpliga kvaliteter rostfritt stål anges i text; inga dimensionsuppgifter.

+ i tabellen: materialet ingår i standarden, dimensioner, ev. beläggning mm specificeras

- i tabellen: inga uppgifter om materialet i standarden

Lina – flertrådig; 'wire', 'Seil', 'stranded cable'

Band – 'strip', 'Flachmaterial'

Tråd – entrådlig ledare; 'round wire', 'thread', 'Draht'

I Elsäkerhetsverkets föreskrift FS 1999:5 (R03) anges som råd i avsnitt 542.2, Jordelektroder att (punkt 542.2.3 - .4) jordelektroden ska vara utförd så att korrosion inte orsakar 'mekanisk skada' och att vid utformningen ska hänsyn tas till att övergångsresistansen kan öka på grund av korrosion. *'Jordelektrod av koppar, varmförzinkat stål eller kopparbelagt stål kan accepteras. Även betongarmering, ingjuten i betong i mark, kan användas som jordelektrod'*. Angående jordelektroder för anläggningar >1000 kV sägs i §B75 e: *'Som jordelektrod får användas för ändamålet särskilt anordnade plåtar av koppar samt linor, rör eller profilstänger av koppar eller varmförzinkat stål ävensom linor, tråd eller stänger av kopparbelagt stål'*, d.v.s. jordningslinor kan vara av koppar, varmförzinkat stål eller kopparbelagt stål.

Aluminium eller aluminiumbelagda material kan ingå i ett jordningssystem men i många föreskrifter sägs också explicit att de inte ska användas i kontakt med eller i omedelbar anslutning till jord, till exempel New Zealand Code of Practice for Power System Earthing (6), punkt 2.4.8.

Rostfria stål diskuterades utförligt i prEN 50114:1993¹ (5). Som jordelektrodmaterial föreslås stål med minst följande legeringstillsatser för att vara tillräckligt korrosionshårdigt i jord:

Cr > 16,5 vikts%; Mo > 2,0 vikts%; N 0,12 – 0,22 vikts%; Ti 5 x % C till 0,8 vikts%

Rostfritt stål, som alternativ till koppar eller kopparbelagt stål, kan användas för jordelektroder i korrosiva jordområden enligt den tidigare nämnda NZ Code of Practice for Power System Earthing (6). Anvisningar för dimensioner ges inte i dokumentet.

4.2 Sammanställning av förekommande material

Översikten i Tabell 4 visar material som identifierats som använda, exponerade i försök eller föreslagna eller marknadsförda för jordelektroder vid kraftnät.

Material för alla former av jordelektroder, även spett och plåtar, är inkluderade i översikten.

Tabell 4 Översikt över material, använda, exponerade i försök, föreslagna eller marknadsförda för jordelektroder.

Material	
Koppar	Bly
Koppar med tennbeläggning	Aluminium med kopparbeläggning
Koppar med zinkbeläggning	Aluminium
Kolstål	Aluminium- och ställina
Förzinkat kolstål	Kiseljärn: 'silicon iron', Duriron
Kolstål med kopparbeläggning	Legerat stål "NiResist"
Kolstål med tennbeläggning	Kolstål med beläggning av rostfritt stål
Kolstål med aluminiumbeläggning	Rostfria stål
Kolstål med blybeläggning	Zink (gediget)
Stål i betong (armeringsjärn)	Magnesium

¹ prEN 50114 utarbetades inte till en självständig EN-standard för jordningsmaterial. Krav på jordningsmaterial enligt CEN är infogade i EN 50341. Texten till prEN 50114 återfinns till stor del i den tyska normen DIN VDE 0151, Werkstoffe und Mindestmaße von Erden bezüglich der Korrosion (1986) (4).

Grundläggande kriterier för materialval allmänt är funktion (ledningsförmåga), beständighet (korrosionshårdighet), mekaniska egenskaper (hållfasthet). Dessutom har miljöaspekter (bly), pris, tillgänglighet och hanterbarhet betydelse.

I praktiken används till helt övervägande del fortfarande koppar, enligt Gummow 2004 till 90 % i USA (48). Koppar är en mycket god elektrisk ledare och är väl beständig i jord. Det tar mellan 400 och 2 500 år innan en jordningslina av koppar med tvärsnittsarea 50 mm² korroderar av (53).

Mer allmänt använda alternativ till koppar är obelagt, förzinkat och kopparbelagt stål, i någon mån rostfritt stål. Praxis vid val av alternativa material förefaller variera mellan olika länder.

Om ledningsförmågan för koppar sätts som likare (100 %), har aluminium en ledningsförmåga i storleksordningen 50-60% av koppars, stål ca 10 % och rostfritt stål ca 2-5 %, se Tabell 5. Ledningsförmågan för flertalet metaller är emellertid fullt tillräcklig för ändamålet. Skillnaderna kan kompenseras genom dimensionering av jordelektrodena, och för jordtagets motstånd har övergångsmotståndet elektrod till jord större betydelse.

Tabell 5 Ledningsförmåga och smälttemperatur för jordelektrodmateriel, efter Abrego, Arevalo & Morales (62), s 64)

Material	Ledningsförmåga (%)	Smälttemperatur (°C)
Koppar, högren, mjukglödgad	100,0	1083
Koppar, kommersiell, hårdglödgad	97,0	1084
Kolstål med kopparbeläggning*, tråd	40,0	(1084)
Kolstål med kopparbeläggning*, tråd	30,0	(1084)
Kolstål, stav klädd med koppar (254 µm)	20,0	(1084)
Aluminium, rent (EC)	61,0	657
Aluminium, AA5005	53,5	652
Aluminium, AA6201	52,5	654
Kolstål, stav klädd med aluminium	20,3	(657)
Kolstål (1020)	10,8	1510
Kolstål, stav klädd med rostfritt stål (304) 508 µm	9,8	(1400)
Kolstål, förzinkat	8,6	(419)
Rostfritt stål typ 304	2,4	1400

*Två olika beläggningstjocklekar

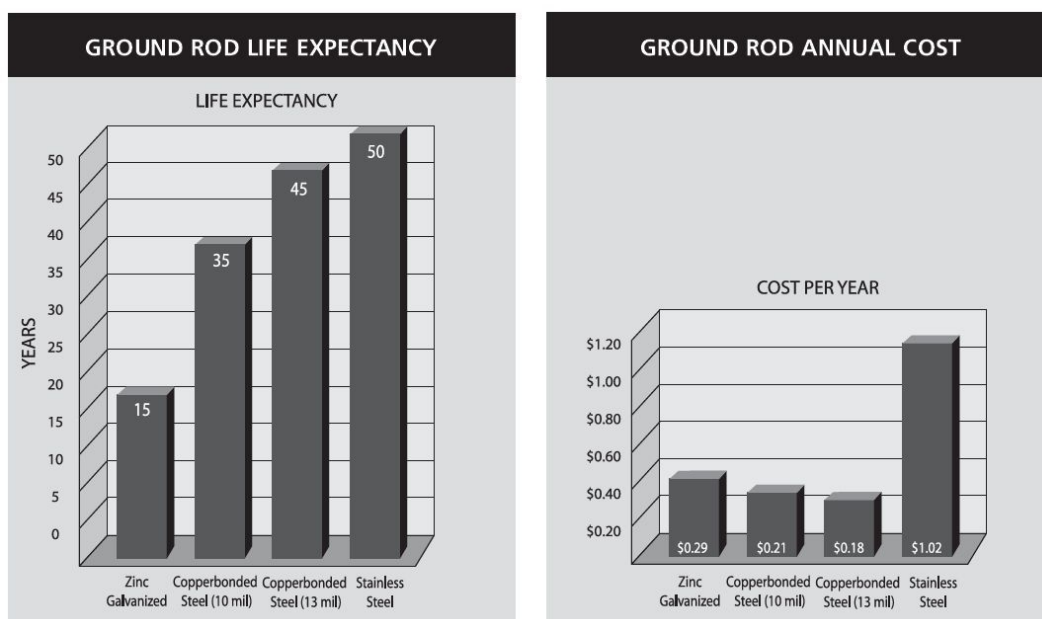
På kort sikt kan flera uppräknade material ovan avföras från diskussionen på grund av miljöaspekter (bly), mekaniska egenskaper, och kommersiell tillgänglighet i trådform. Som exempel är magnesium och zink inte hållfasta i tråd, och inte heller tillräckligt korrosionshårdiga. NiResist och kiseljärn, är båda gjutjärn och därmed knappast tillgängliga i trådform, dessutom spröda, (19). I ett längre perspektiv kan bedömningen bero på hur lång utvecklingstid och kostnader som kan vara acceptabla, till exempel också för att få acceptans för material som för närvarande inte är upptagna i gällande föreskrifter eller till och med uttryckligen utesluts.

Det framgår inte ur normerna för jordningssystem vad som bör styra valet av material ur korrosionssynpunkt; hur omfattande korrosionsangrepp och vilka korrosionsformer som kan tolereras. Det framgår inte heller vilka effekter av korrosion som är avgörande; försämrade hållfasthet, förträngningar i strömbanan, ökat övergångsmotstånd.

Aluminium får enligt många nu gällande föreskrifter inte användas för delar av jordningen som är i kontakt med jord, orsaken anges vara otillräcklig korrosionshårdighet. Aluminiumlina med ståltråds kärna installerades ändå som jordningslina i Irland med uppskattad livslängd av 20 år i jord, (27).

Företaget Erico anger följande livstider för jordspett av olika material, (52), (46). I Figur 3 anges, förutom förväntad livslängd, även årskostnaden för alternativa material för jordspett.

Förzinkat stål, ca 100 µm Zn	15 år
Kopparbelagt stål, Cu 250 µm	35 år
Kopparbelagt stål, Cu 330 µm	45 år
Rostfritt stål	50 år



Figur 3 Förväntad livslängd och kostnad per år för jordelektroder, (52) s. 13

Efterfrågan på alternativ till koppar har tidigare främst föranletts av risken för galvanisk korrosion på närbelägna konstruktioner och ökat strömbehov i katodiska skydd. På senare tid har ökade stölder av koppar och det höjda priset fått betydelse.

I den mån koppar orsakar galvaniska problem på andra konstruktioner kvarstår dessa då kopparbelagda metaller används. Kopparbeläggning på stål används främst för att öka livslängden. Ökningen av ledningsförmåga som kopparbeläggningen ger är i praktiken av mindre betydelse. Ur korrosionssynpunkt är risken för koncentrerade angrepp på stålet i defekter och skador i beläggningen ett problem genom den galvaniska effekten från en stor kopparyta (katod) på en liten stålyta (anod).

Ytbelagd koppar undanröjer inte tillgreppsriskerna så snart det blir känt att koppar finns i produkten. Tenn- eller blybelagd koppar är väl korrosionshärddigt, och antas ge mindre galvaniska problem. Tennbeläggning förväntas bli mindre katodisk än koppar mot konstruktionsstål och zink i jord, men enligt Heim (24) medförde tennbeläggningen inga elektrokemiska fördelar. Zinkbeläggning på koppar innebär att jordelektroden blir mindre ädel. Korrosionshårdigheten för zinken minskar emellertid ytterligare vid skador i beläggningen genom galvanisk inverkan av koppar.

Förzinkat stål har fördelen att vara billigt jämfört med koppar, inte stöldbegärligt, och medför ingen risk för galvanisk korrosion. Det är dock klart mindre korrosionsbeständigt än koppar. Zinkbeläggningarna i Enricos jämförelse är dock relativt tunna.

Strömbehovet för att polarisera olika material för jordelektroder, av intresse vid risk för kontakt med katodiskt skyddade installationer, diskuteras av Gummow (48). I oluftad jord (lera) befanns strömbehovet för alla undersökta metaller (kolstål, kiseljärn, kopparbelagt stål, rostfritt stål, förtennad koppar, zinkband och magnesium) vara lågt, och i princip samma som för kolstål. I väl luftad jord var strömbehovet för kolstål, kiseljärn och tennbelagd koppar ca $20 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, för rostfritt stål ca $7-8 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ och för koppar (kopparbelagt stål) ca $200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

4.2.1 Jordelektroder och jordningssystem: kommersiella leverantörer

För jordningslinor används ofta tråd eller lina avsedda även för andra ändamål än jordningslinor. Linor med dimensioner och andra egenskaper motsvarande krav i aktuella standarder väljs. Några större specialiserade företag marknadsför produkter specifikt för jordning, främst jordspett, tillhörande ledningar och anslutningar med mera.

Erico International (Solon, OH; 20-tal dotterbolag internationellt) marknadsför bl.a. Eritech "grounding materials and accessories", till exempel jordspett i olika utföranden: förzinkade, rostfria, kopparklätt stål etc. motsvarande krav i olika nationella standarder.

Bimetallic Products Division Lafayetteville, del av Dofasco, tillverkar bl.a. kopparbelagt stål (Copperweld) som lina och jordspett och även kopparklädd aluminiumtråd.

Torpedo Speciality Wire Inc., Rocky Mount, NC, tillverkar alla slag av kabel, tråd och wire med olika beläggningar, bland annat kopparklädd ståltråd för jordningslina.

Jarden Zinc Products, Tennessee: zinkband för jordning.

Mycket jordningsmaterial marknadsförs av företag som arbetar med åsk-skydd, t ex *Stone Lightning Protection* och *Fuse Electrodes* i Storbritannien, *Dehn & Söhne* i Tyskland.

5 Korrosion på jordelektroder

5.1 Allmänt

En bra allmän översikt över korrosionsproblem i jordtag för elektriska system har gjorts av Abbott och Schillmoller (14). Eftersom arbetet gällde förhållanden i USA betonas galvaniska problem för närliggande konstruktioner och interaktionen med katodiska skydd från obelagd kopparjordning. Översikten är gjord 1962 men är trots detta fortfarande i stora stycken aktuell.

Faktorer som påverkar korrosion av jordelektroder i jordningssystem är i princip

- materialens egenkorrosion i jord:
 - korrosionshastighet i olika jordar,
 - korrosionstyp,
 - korrosionsprodukter: mängder, ledningsförmåga, (ev. miljöeffekter)
- galvaniska egenskaper (potential, 'ädelhet')
 - i förhållande till material i kringliggande konstruktioner;
 - i förhållande till anslutningar och andra delar i jordningssystemet;
 - för klädda eller belagda material, t.ex. kopparklätt stål; galvaniska effekter vid skador i beläggningen
- inverkan av ström
 - inducerade effekter (se avsnitt 5.4
 - läckströmskorrosion
- uppkomst av makroceller främst genom olikheter i jordens sammansättning, luftning vid olika delar av metallen. Risken ökar på utsträckta föremål som jordningslinor där skiftande jordmiljöer längs linan är sannolika, se avsnitt 5.2.
- ev. inverkan av kraftiga ström- och spänningspulser t ex vid blixtnedslag eller felströmmar: högttemperaturoxidation, inverkan på fogar och ytbeläggningar.

Korrosionen påverkas som framgår ovan inte bara av material och jordmiljö utan också av jordelektrodens form. Med sin långa sträckning och den relativt låga tvärsnittsarean är jordningslinor extrema som jordförlagda konstruktioner. Rörledningar i jord torde vara den närmaste parallellen. Vissa korrosionsangrepp, främst lokala former som punktfrätning, påverkar funktionen hos en jordningslina mer än hos ett spett eller en plåt.

Också utformningen som enkel tråd eller lina med flera kardeler inverkar genom att trådar delvis ligger mot varandra varigenom spalter kan bildas.

5.2 Galvanisk korrosion

Risker för galvanisk korrosion vid kontakt mellan olika metaller föreligger vid sammanfogning av olika metaller; t.ex. i avsiktliga skarvar eller vid oavsiktlig kontakt med närliggande konstruktioner; som vid kontakt mellan kopparjordning och ledningar i jord. Sammanställningar över "olämplig" och "lämpliga" kombinationer är vanliga, se exempel i Figur 4.

I de fall de sammanfogade metallerna har olika stora ytor gäller regeln "stor anod, liten katod" d.v.s. angreppen blir mindre allvarliga i de fall ytan hos den oädlade metallen är störst. Detta illustreras i Figur 5 där det t.ex. framgår att stål i betong blir relativt ädelt och accelererar korrosionen av öppet exponerat stål. Följderna blir mest allvarliga med stor stålyta i betongen och liten utanför. Betong är av intresse vid jordning eftersom armerade betongkonstruktioner i jord kan användas som del av jordningssystemet.

Materialkombinationer i överspänningsskydd, avledare etc.											
Under förutsättning att speciellt aggressiva miljöförhållanden inte råder kan följande material kombineras											
	Varmförzinkat stål		Aluminium Al-legeringar		Koppar		Rostfritt stål		Titan		Tenn
Varmförzinkat stål	ja		ja		nej		ja		ja		ja
Aluminium Al-legeringar	ja		ja		nej		ja		ja		ja
Koppar	nej		nej		ja		ja		nej		ja
Rostfritt stål	ja		ja		ja		ja		ja		ja
Titan	ja		ja		nej		ja		ja		ja
Tenn	ja		ja		ja		ja		ja		ja

Figur 4 Galvaniska korrosionsrisker vid sammanfogning av olika metaller (ja = ingen risk under förutsättning att speciellt aggressiva miljöförhållanden inte råder), efter ABB Merkblatt 9, 2003, (47)

Materialkombinationer i jordningsanläggningar, vid olika areaförhållanden
(från DIN V VDE V 0151: 1986-06)

Material med liten area	Material med stor yta				
	Förzinkat stål	Stål	Stål i betong	Förzinkat stål i betong	Koppar Rostfritt stål
Förzinkat stål	+	+ zinkförbrukning	-	+ zinkförbrukning	-
Stål	+	+	-	+	-
Stål i betong	+	+	+	+	+
Stål med Cu-mantel	+	+	+	+	+
Koppar Rostfritt stål	+	+	+	+	+

+ sammanfogningsbar
- icke sammanfogningsbar

Figur 5 Galvaniska korrosionsrisker vid sammanfogning av olika metaller med olika stora ytor, efter ABB Merkblatt 9, 2003, (47).

5.3 Makroceller

Makroceller kan beskrivas som koncentrationsceller som bildas mellan olika delar av ett föremål genom skillnader i olika korrosionspåverkande faktorer, i jord i första hand luftning, och jordsammansättning men också t ex temperatur. Sannolikheten för att skillnader kommer att finnas är naturligtvis större för jordningslinor som passerar genom långa marksträckor. På ett vertikalt neddrivet spett kan å andra sidan skillnaden i luftning vid jordytan och nere i marken bli korrosionsdrivande. En lerklump intill en metallyta som för övrigt ligger i sand kan också ge upphov till en makrocell. Korrosionsangreppen blir i regel av lokal natur.

För att förebygga makroceller bör t.ex. återfyllning omkring nergrävda föremål göras med så väl homogeniserad jord som möjligt.

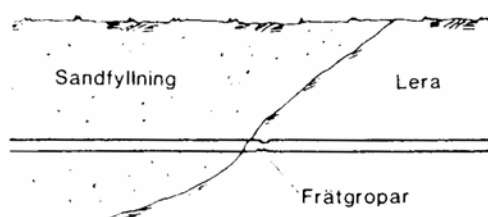


Fig 59. Korrosionsangrepp på stål-rörsledning vid gränsen mellan lera och sandfyllning.

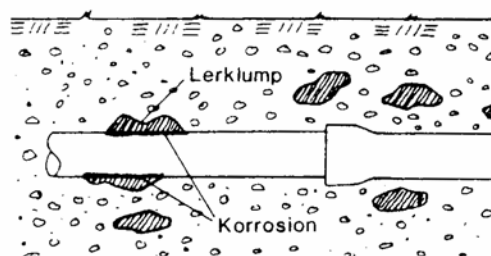


Fig 60. Korrosionsangrepp under lera på stål-rörsledning i sandfyllning, som innehåller lerklumpar.

Figur 6 Korrosionsangrepp genom skillnader i jordmiljö omkring ett metallföremål (E. Mattson: Elektrokemi och korrosionslära, 2 utg., 1992, s 61)

5.4 Växelströmskorrosion

Korrosion till följd av växelström kan dels vara av typen läckströmskorrosion, dels bero på inducerade effekter från växelspänningen, p.g.a. asymmetri mellan faserna. Växelströmskorrosion anses i allmänhet i praktiken vara en klart mindre skaderisk än korrosion från likström. Metaller som aluminium, magnesium, titan och även rostfria stål är dock känsligare än koppar, zink och bly. Verkningarna styrs främst av strömtätheten. Den kritiska strömtätheten anges till storleksordningen några (aluminium) till något 10-tal A/m^2 (koppar). Strömtätheter på jordelektroder är i allmänhet låga, och endast enstaka skadefall är kända (63). Under olyckliga omständigheter kan dock angreppet gå snabbt, som i ett fall med inducerad växelström i aluminiumlinor liggande på marken under en kraftledning (64).

6 Material för jordelektroder: korrosion i jord

6.1 Korrosion av metaller i jord

Allmänt underlag: Harris & Eyre i Shreir, Jarman, Burstein: Corrosion (74) och Elsner i DECHEMA Corrosion Handbook (75).

I flertalet utförda undersökningar av korrosion i jord har exponering gjorts med plåtar, rör och stänger. Storleksordningen av korrosionshastigheten för metaller i olika jordar visas i Tabell 6.

Tabell 6 Jämn och lokal korrosion för metaller och legeringar i olika jordar. (Dechema Corrosion Handbook vol. 2, Dechema & VCH, 1988, s 262)

Table 12: Corrosion of various metals in different soils [14]

Metal	Sandy Loam	Clay	Marshy Soil	Alkaline Soil	Sandy Loam	Clay	Marshy Soil	Alkaline Soil
	Material Consumption Rate $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$				Deepest Pitting $\text{mm} \cdot \text{y}^{-1}$			
Aluminium 99.25 Al	0.008	0.029	0.013	0.039	0.053	D	L	D
Duralumin® 94.23 Al; 4.10 Cu	—	0.120	0.012	D	—	D	G	D
AlMn-alloy 97.75 Al; 1.12 Mn	0.032	0.017	0.018	0.026	D	0.036	0.033	0.048
Open-hearth steel	0.820	0.470	D	D	D	0.178	D	D
Cu-steel 0.2 Cu	D	0.454	D	D	D	0.15	D	D
Copper	0.012	0.037	—	0.012	G	L	—	L
Brass Ms 60	0.065	0.043	0.008	0.008	G, E	G, E	G, E	G, E
Bronze Sn-Bz 10	0.012	0.038	0.380	0.041	0.028	G	0.028	0.079
Sheet zinc 99.5 Zn	0.290	0.074	0.192	D	0.102	0.043	0.084	D
Sheet zinc, standard	0.159	0.092	0.375	D	0.132	0.051	0.094	D
Refined lead 99.99	0.011	0.057	0.052	0.017	0.028	L	0.023	0.028
Lead 99.93 Pb; 0.057 Cu	0.031	0.150	0.064	0.074	0.043	0.064	0.031	0.046

L = local pitting, pits no deeper than 0.15 mm

G = slight corrosion, no pitting

E = dezincification over large areas

D = perforations

En rad faktorer styr metallers korrosion i jord. Värderna på några jordegenska- per som inverkar på korrosion visas i Tabell 7. Som första approximation klas- sas jordars korrosivitet ofta efter deras resistivitet. Jordar med låg resistivitet, d.v.s. med god ledningsförmåga, antas vara mer korrosiva, Tabell 8.

Tabell 7 Gränsvärden för några jordparametrar (Dechema Corrosion Handbook vol. 2, Dechema & VCH, 1988, s 243)

Property	Unit	Max. Value	Min. Value
Electrical resistance	$\Omega \cdot \text{cm}$	54 400	32
Moisture content	%	75.5	2.3
Interstitial air space	%	40.6	1.1
Apparent density	$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	2.1	1.4
Shrinkage	%	42.7	0
Total acid content	mg equivalents per 100 g soil	297.0	0
pH		10.2	2.6
Composition of the aqueous extract:	mg equivalents		
Na + K as Na	per 100 g soil	45.1	0
Ca	per 100 g soil	19.2	0
Mg	per 100 g soil	9.4	0
CO ₂	per 100 g soil	4.6	0
Cl	per 100 g soil	43.3	0
SO ₄	per 100 g soil	46.5	0

Tabell 8 Klassning av jordars korrosivitet efter resistivitet (Dechema Corrosion Handbook vol. 2, VCH & Dechema, 1988, s 243)

Corrosive Attack to be Expected	Soil Resistivity $\Omega \cdot \text{cm}$
Very marked	< 500
Marked	500 – 1000
Average	1000 – 2000
Normal	2000 – 10000
Slight	> 10000

Korrosionshastigheten beror också för många metaller av exponeringstidens längd. Tabell 9 visar den initiala korrosionshastigheten och korrosionshastigheten efter längre tids exponering i jord för kolstål, zink och förzinkat stål.

Tabell 9 Initial korrosionshastighet, korrosionshastighet i fortvarighetstillstånd och beräknad korrosion efter 50 år, för kolstål, zink och förzinkat stål (Merkblatt 400, Stahl-Informationszentrum, Dusseldorf, 2001 (42)).

Jordkorrosivitetsklass/ /aggressivitet	I låg	II måttlig	III hög
	initial korrosionshastighet w_o i $\mu\text{m}/\text{år}$		
Fe	50	60	68
Zn	7	15	55
förzinkat stål	13	30	55
	korrosionshastighet, fortvarighetstillstånd, w_{lin} i $\mu\text{m}/\text{år}$		
Fe	7	15	68
Zn	5	7	44
förzinkat stål	2	3	36
	beräknad avfrätning efter 50 år (mm)		
Fe	0,44	1,92	3,68
Zn	0,24	0,37	2,23
förzinkat stål *)	0,12	0,20	1,86

*) anges endast som jämförelse, beräknad avfrätning överstiger ett zinkskikts tjocklek

Omfattande data för korrosion i svenska jordar finns för kolstål, zink, koppar, aluminium och rostfria stål, liksom för zink, aluminium och zink-aluminiumlegeringar som beläggningar på kolstål från långvariga exponeringar vid Korrosionsinstitutet (65), (68), (70), (71), (72).

För jordningslinor måste observeras att lokala angrepp kan få större konsekvenser än hos jordningsspett bland annat på mekanisk hållfasthet. En genom korrosion lokalt starkt minskad tvärsnittsarea medför dessutom risk för lokal avsmältning vid felströmmar. Var avfrätning, lokal avsmältning eller mekaniskt brott p.g.a. lokalt minskad tvärsnittsarea, sker har också betydelse. Brott nära stolpe har större inverkan på jordningen än brott längre ut på linan.

Vid korrosionsprocessen kan svårösliga korrosionsprodukter bildas på metall-ytan, beroende på metall och på jordens egenskaper. I vilken utsträckning detta påverkar motstånd och strömöverföring från metall till jord är oklart.

6.1.1 Koppar

Koppar har mycket god korrosionshårdighet i de flesta typer av jordar. Klorider i miljön ökar inte korrosionshastigheten nämnvärt. Korrosion kan inträffa i jordar med höga halter sulfider, svavelhaltiga organiska föreningar och ammoniumföreningar, liksom i jordar med sur reaktion och dålig luftning (t ex vattenmättade torvjordar). Korrosionsangreppen är i huvudsak lokala.

Efter 7 års exponering av koppar i svenska jordarter befanns den jämna korrosionen på koppar vara i stort sett försumbar (maximalt 3,9 $\mu\text{m}/\text{år}$), och den lokala korrosionen (gropfrätning) maximalt 21 $\mu\text{m}/\text{år}$. Korrosionen var lägst i torvjord och något högre och sinsemellan tämligen lika i sand, sandig morän och gyttjig lera, (65) s 107-119.

6.1.2 Kolstål

Korrosionshastigheter för kolstål i svenska jordar är väl dokumenterade från långtidsexponeringar i fält. Korrosionshastigheten avtar med tiden. Korrosionsprodukter kan bilda skikt av s.k. rostpansar omkring järnföremål i jord. Korrosionsangreppen är av både jämn och lokal typ. Lokala korrosionshastigheter i storleksordningen 30 till 250 μm , och jämna hastigheter i storleksordningen 3 till 30 $\mu\text{m}/\text{år}$ uppmättes i en 7-årig exponering (Vinka, (65), s 73-89)

6.1.3 Andra legerade stål

Mindre tillsatser av olika legeringsämnen påverkar inte korrosionsegenskaper i jord i högre grad. Rosttröga stål (weathering steels) av typen Corten, som har en mycket god korrosionshårdighet i atmosfär genom den skyddande patinan som bildas främst tack vare kopparinnehållet i legeringen, är i jord inte påtagligt mer korrosionshårdiga än flertalet konstruktionsstål.

Högre legerade gjutjärn av typen kiseljärn som har en kiselhalt av storleksordningen 4 – 18 % används relativt sällan i jord, men har i regel mycket god korrosionshårdighet i de flesta jordar. Det gäller särskilt materialen med kiselhalter på 12 – 18 %.

Gjutjärn med hög nickelhalt (NiResist) har god korrosionshårdighet i jord, men används sällan på grund av högt pris. Materialen korroderar men rostangreppen är endast ytliga.

På grund av de goda resultaten för kiseljärn och Niresist i NBS' stora exponering av metaller i jord (73) inkluderades de i NACE-NCEL-undersökningen av alternativa material för jordspett (se avsnitt 7.1.1). Några erfarenheter av materialen i jord i Sverige finns inte dokumenterade.

6.1.4 Rostfria stål

Passivskiktet som till stor del ger rostfria ståls deras korrosionshårdighet är beroende av syre för att återbildas i skador. Korrosionsangreppen på rostfria stål är främst av lokal typ, vilket ökar risken för genomfrätningar och brott på linor. Närvaro av klorider ökar starkt benägenheten för gropfrätning. I NBS omfattande undersökning av metallers korrosion i jord (73) var jordar med hög kloridhalt och dålig luftning mest aggressiva. De molybdenhaltiga austenitiska stålen var mest korrosionshårdiga.

Vid en exponering av 4 rostfria stålqualiteter i Sverige (3 provningsplatser, 25 år) korroderade SS 2321 påtagligt, med en gropfrätningshastighet av upp till 240 $\mu\text{m} / \text{år}$, medan angreppen på SS 2343 och SS 2376 var obetydliga (Johansson (66), Vinka (67)). Risken för spänningskorrosionssprickning i närvaro av klorider för i övrigt väl korrosionshårdiga austenitiska stål påpekas.

6.1.5 Aluminium

Rent aluminium uppges i regel vara mer korrosionshårdigt i jord än flertalet aluminiumlegeringar. Aluminium och aluminiumlegeringar korroderar framför allt i torvjordar och jordar med höga halter av salter, liksom i vattenmättade dåligt luftade jordar, och i tydligt alkaliska jordar. Upplöst koppar i jorden kan också accelerera korrosion av aluminium. Som framgår av Tabell 6 är korrosionen företrädesvis lokal (gropfrätning).

Vid exponering av aluminium i jord i Sverige (7 provningsplatser) var korrosionsangreppen efter 3 år praktiskt taget enbart lokala (gropfrätning). Gropfrätningshastigheten varierade mellan 5 och 1150 $\mu\text{m}/\text{år}$. Kloridhalten i jorden påverkade korrosionen tydligast och kraftigast. Al-Mg2.5 var bäst korrosionshändig i överensstämmelse med litteraturuppgifter (Camitz, Vinka, (68), (69)). Efter 7 års exponering varierade medelvärdet för gropfrätningshastigheten mellan 38 och 522 $\mu\text{m}/\text{år}$ för provningsplatserna, med det högsta värdet för kloridhaltig gyttjig lera (Göteborg) (69).

I många jordningsföreskrifter utesluts aluminium från användning i jord. Främsta orsakerna torde vara att korrosionshårdigheten har ansetts bristfällig, men hänvisningar finns också till högt övergångsmotstånd p.g.a. korrosionsprodukter på aluminiumytan (62).

6.1.6 Övriga metaller (bly, tenn, zink)

Bly är i regel väl beständigt i jord genom att det bildas svårlösliga skyddande skikt av blyföreningar på ytan. Tenn har dålig korrosionshårdighet i dåligt luftade jordar med hög halt organiskt material. Zinks korrosionshårdighet i jord varierar starkt med jordtyp. Dåligt luftade jordar, jordar med höga halter lösta salter eller med lågt pH är vanligen aggressivast. Även högt pH ger angrepp.

6.1.7 Ytbelagda metaller

Korrosionen påverkas förutom av metallbeläggningens och grundmetallens egen korrosionshårdighet också av galvaniska effekter mellan beläggning och grundmetall i belägningsdefekter och skador.

Med en ädlare beläggning som t ex koppar på stål innebär skador och defekter att man har en liten anodyta som korroderar i förhållande till en stor katodyta (beläggningen). Angrepp på underliggande metall accelereras alltså. Kolstålet i jordspett av kolstål belagda med rostfritt stål eller koppar hade efter 7 års exponering korrosionsangrepp under beläggningen upp till 2,5 resp. 5 cm omkring spetsen där beläggningen sannolikt skadats vid neddrivningen i jorden (57), (19).

En oädlare beläggning ger i stället en stor anodyta som skyddar underlaget i skador. Skyddsförmågan kvarstår så länge ytskiktet täcker större delen av ytan. Förzinkat stål rekommenderas ofta som huvudalternativ till koppar med hänsyn till att man inte får galvanisk korrosion vid kontakt med stolpar och stag av förzinkat stål, d.v.s. gnistgap behövs inte. Livslängden blir dock starkt beroende av jordtyp, se punkt 6.1.6.

Beläggningar av zink, aluminium och zink/aluminium på kolstål visade varierande korrosionshårdighet jämförda med varandra efter upp till 11 års exponering i olika jordar i Sverige. I måttligt korrosiva jordar som till exempel sand var beläggningar av aluminium och zink tämligen likvärda förutsatt att tillräckligt tjocka beläggningar användes (minst 200 μm), och bedömdes kunna ge korrosionsskydd under 10-20 år. I en korrosivare lerjord var beläggningar av 50 % aluminium- 50 % zink att föredra. Korrosionshastigheten hos beläggningarna låg i storleksordningen 1 $\mu\text{m}/\text{år}$ för aluminium och 3,5 $\mu\text{m}/\text{år}$ för zink i sandjord, och 3-6 $\mu\text{m}/\text{år}$ för aluminium och 17-24 $\mu\text{m}/\text{år}$ i gyttjig lerjord. I båda jordtyperna fanns rödrost och genomfrätningar ner till kolstålet på prover redan efter 2 år, Johnsson (70), Sjögren (71).

6.2 Plåtexpo­neringar: relevans för jordningslinor

Korrosionshastighet och korrosionsformer styrs av materialet och jordmiljön, Jordmiljöns korrosivitet påverkas av en rad parametrar, bland andra lokal geologi (jordtyper). Därutöver är det en bedömnings- och avvägningsfråga på vilket sätt och i hur stor utsträckning andra faktorer som föremålets form, driftsparametrar (här t.ex. strömpåverkan från nätet) i olika fall påverkar korrosionen och jordelektrodens funktion. Detta sammanställs i uppställningen nedan.

Jordelektrodens form och placering - inverkan på korrosionen

Plåt, spett	Lina
Vertikalt i jord $\Rightarrow$ skillnader jordlager, luftning $\rightarrow$ koncentrationsceller	Horisontellt i jord $\Rightarrow$ homogenare luftning & jordmiljö vertikalt
Liten utsträckning $\Rightarrow$ mindre variation horisontellt	Lång $\Rightarrow$ varierande miljö = risk för makroceller

På grund av skillnader i jordkorrosivitet; svenska jordar skiljer sig från dem i Mellaneuropa och USA, är lokala korrosionsdata för material sannolikt av större värde än resultat från exponering av faktiska jordelektroder i jord av annan typ. Vid användningen av data måste dock hänsyn tas till de faktorer som speciellt kan påverka en jordningslina.

Några exponeringar av jordelektroder har gjorts utomlands, då i huvudsak av jordspett. Jordlinor ingår endast i enstaka fall, se avsnitt 7.1.

6.3 Svenska jordars korrosivitet

Korrosion av metaller i jord styrs av en rad parametrar, dels sådana som är naturligt knutna till jordmiljön, som jordart, resistivitet, luftning, grundvattnenivå, förekomst av mikroorganismer, och dels olika slag av miljöpåverkan som industriella föroreningar, byggnader mm.

Olika modeller har tagits fram för sammanjämkning av faktorer till klassningar av korrosivitet. Klassningarna är i regel ganska grova. Svenska jordar skiljer sig från den europeiska kontinenten bland annat genom en i regel lägre kalciumkarbonathalt. Mycket extremt alkaliska eller salthaltiga jordar som i USA är också sällsynta.

För zink och varmförzinkat stål i svenska jordar har det visats att korrosionshastigheten i ett område med gott resultat kan förutsägas med utgångspunkt från jordarten (72), (65): sand har visat sig minst och torv mest korrosivt. En korrosivitetskarta kan alltså i princip sättas upp med utgångspunkt från kartläggning av jordar i de aktuella områdena.

7 Jordelektroder: undersökningar och erfarenheter av korrosion

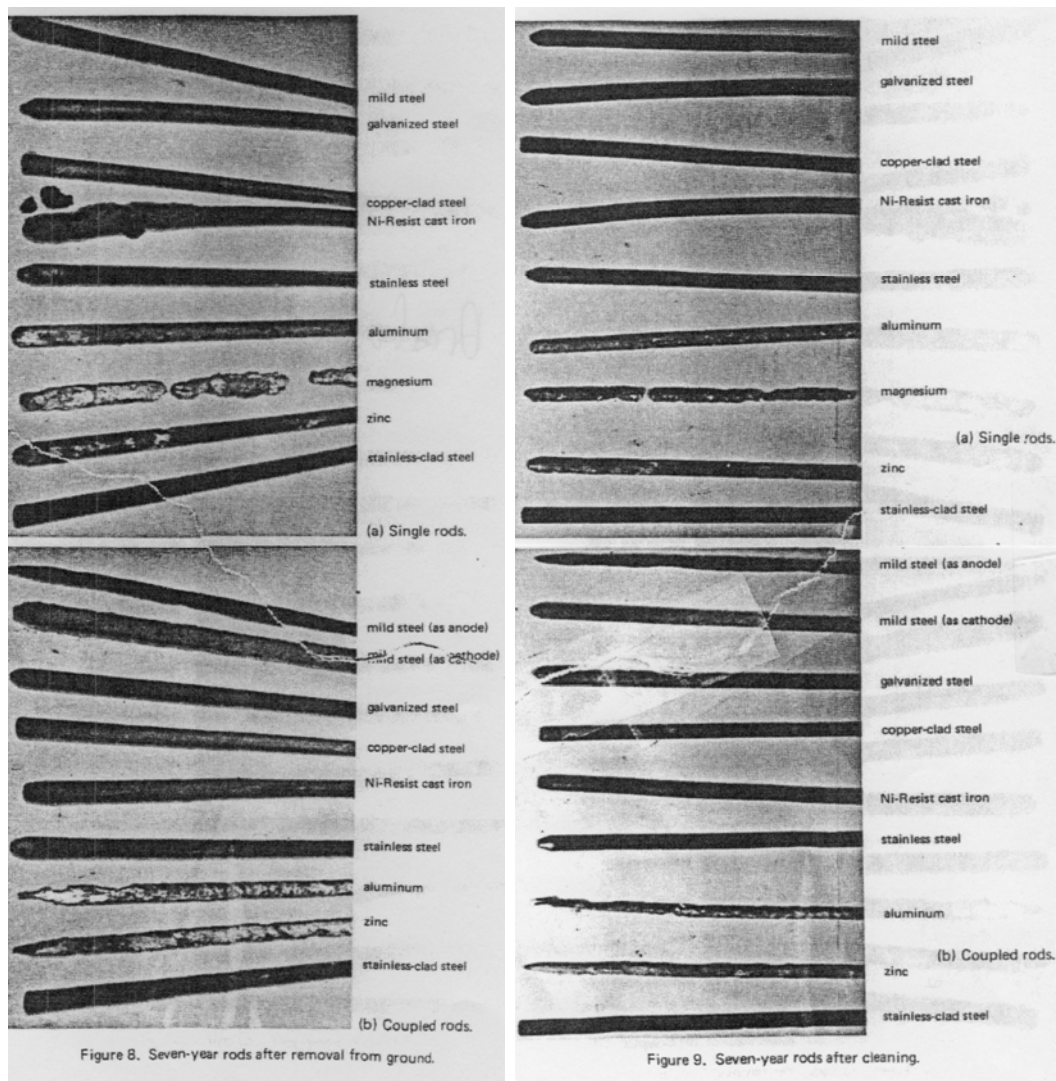
7.1 Fältextponeringar och laboratorieundersökningar

Två större korrosionsundersökningar specifikt av material för jordelektroder har gjorts, dels en 7-årig fältextponering i USA, genomförd av National Association of Corrosion Engineers (NACE) i samarbete med Naval Civil Engineering Laboratory (NCEL) under 1960-talet, dels en laboratorie- och fältundersökning i Tyskland 1979 – 1981 under ledning av G. Heim. Båda undersökningarna föranleddes av problem på grund av galvaniska effekter mellan kopparjordning och konstruktionsmaterial som stål och förzinkat stål i jord. Målet i båda fallen var att minska risken för galvanisk korrosion genom ett jordningsmaterial som var mindre katodiskt än koppar.

Dessutom finns två nyare projekt: National Electrical Grounding Project 1995 – 2005 med fokus främst på funktionen hos olika typer av jordelektroder vid exponering i jord, och en fältextponering genomförd av Electrical Power Research Institute, EPRI under 2000-talet, inriktad på strömöverföring från olika jordelektroder.

7.1.1 NACE - NCEL

Fältextponeringarna i USA avsåg material för jordspett, 'ground rod' (13), (15), (17), (18), (19). Exponeringar av jordspett gjordes i olika jordar, och även med materialen kopplade till kolstål. Undersökningen omfattade kolstål, förzinkat stål, kopparklätt stål, 'Ni-Resist cast iron', och rostfritt stål typ 302 som exponerades både av NACE och av NCEL. Dessutom exponerades zink, aluminium, magnesium samt kolstål med beläggning av rostfritt typ 304 av NCEL. Viktförlustbestämningar gjordes efter 1, 3, och 5 och 7 år. Potential, motstånd metall/jord samt ström mellan par av metaller registrerades kontinuerligt. I NACEs studie bedömdes NiResist vara det bästa alternativet till koppar. Spett av NiResist gick dock sönder vid upptag på grund av materialets sprödhet, något som inte har någon större betydelse för jordspett men väl för jordningslinor. NCELS slutrapport rekommenderar rostfritt stål typ 304 eller kolstål belagt med rostfritt stål typ 302 för jordspett baserat på 1) mekaniska egenskaper vid neddrivning i jord 2) korrosionshårdighet 3) galvanisk kompatibilitet med andra metaller (bör inte orsaka ökad korrosion på andra jordförlagda konstruktioner) (19). De något skilda bedömningarna av gemensamma material kan delvis förklaras av att NCELS exponeringar genomfördes på provningsplatser mycket nära stranden av Stilla Havet, med sandjord med mycket hög kloridhalt, i storleksordningen 10 000 till 50 000 ppm. I Figur 7 visas spettens utseende efter 7 års exponering.



Figur 7 Jordelektroder (jordspett) efter exponering i 7 år vid Port Hueneme, vänster: efter upptagning, höger: efter rengöring. Jordspetten i den undre gruppen har varit sammankopplade med kolstål. (Drisko, R W & Hanna (19).

7.1.2 National Electrical Grounding Research Project

I National Electrical Grounding Research Project exponerades ett 40-tal jordningssystem med olika jordelektroder på 10 provningsplatser under upp till 10 år. I några fall ingick också strömbelastning. Tyngdpunkten vid exponeringen lades vid jordningssystem för distributionsnät (56). Materialen omfattade koppar, kopparklätt kolstål, förzinkat kolstål, stål i betong, rostfritt stål. Även tråd och lina exponerades, men endast av koppar; längder om ca 8 – 15 m grävdes ner. Utvärdering av korrosion har gjorts från två exponeringsplatser, i huvudsak som visuell granskning och klassning. Kraftig avfrätning av zinksiktet på förzinkade stålelektroder hade lett till korrosion på stålet. Kopparklädda stålelektroder hade korroderat obetydligt som helhet men där stålet blottats fanns tydliga korrosionsangrepp (57).



Figure 1. 3/4" x 10' galvanized rod removed after 10 years (Pawnee Site)



Figure 2. 5/8" x 8' copperbonded ground rod removed after 10 years (Pawnee Site)

Figur 8 Jordelektroder från National Electrical Grounding Research Program efter 10 års exponering. Förzinkat kolstål t v, kopparklätt stål t h. (46).

7.1.3 EPRI

Försök genomfördes 2000 – 2001; dels undersökningar av olika jordars elektriska egenskaper, dels undersökningar av ström- och spänningsutjämning och jordresistans vid användning av olika jordspett och jordningslinor (counterpoise) i sand, lera och grus (59). Det har emellertid varit svårt att få mer precis information om försöken som främst syftade till att ta fram underlag till en ny utgåva av EPRIs riktlinjer för jordning av kraftnät (10).

7.1.4 G. Heim (Tyskland)

I den tyska undersökningen ingick obelagd koppar, tennbelagd koppar, zinkbelagd koppar, bly, varmförzinkat stål och obelagt stål (23). Fältförsök genomfördes vid fyra kraftstationer med olika materialkombinationer och anod/katodförhållanden 1:1 – 800:1. Även inverkan av växelströmmar på materialen togs upp. Materialen koppar, tennbelagd koppar, bly och stål i betong var alla katodiska i förhållande till stål och förzinkat stål (ger ökad korrosionshastighet hos stålkonstruktioner som är i kontakt). De nämnda materialen var, inom spridningsgränserna för mätvärdena, i stort sett jämförbara som katoder. Vid låga anod/katod-förhållanden var upplösningen av oskyddat stål acceptabelt låg. Vid förhållanden 100:1 kan korrosionen öka till 0,4 mm/år. På zinkbelagt stål korroderar zink med ca 5 µm / år med anod/katodyta 1:1, medan 1:10 ger en korrosionshastighet av 50 µm / år. Försöken med zinkbelagd koppar gav osäkra resultat p.g.a. svårigheter att få en jämn zinkbeläggning. Man påpekar att i laboratorieförsök bör sådana jordsimulerande lösningar användas som gynnar beläggningar (täcksikt) på metallytorna för att få realistiska resultat. Tennbeläggning på koppar medförde inga fördelar jämfört med obelagd koppar med avseende på galvanisk korrosionsrisk. Vid försöken med växelström i laboratorium användes en strömtäthet av 0,3 A/m². Inverkan av växelström inträffar normalt först vid betydligt högre strömtäthet varför ökad korrosion på grund av växelströmseffekter på jordning ansågs kunna försummas (23), Bertling m fl., (28).

7.2 Praktikfall

Aluminiumledare med stålkärna (yttre lager av aluminiumtrådar med kärna av ståltrådar) som sattes in som jordelektroder i Irland för att minska jordresistansen vid jordning av stålmaster uppvisade mycket liten korrosion efter 7 – 10 år på 7 olika platser (27). Efter kompletterande laboratorieförsök bedömdes att aluminiumlina med stålkärna ha en livslängd på över 20 år i irländska jordar med pH-värden 3 – 10. Vissa typer av industriavfall kunde dock accelerera korrosionsskador. Av laboratorieförsöken drogs slutsatsen att stålkärnan kunde fungera som offeranod i jordar med pH upp till 6. Korrosion av aluminium var märkbar i jordar med pH >10. Senare litteratur som följer upp projektet eller diskuterar arbetet har inte återfunnits.

Vid exponeringar i jord i Sverige har aluminiumbelagt stål (beläggning av ren aluminium och aluminium med 10 % kisel) befunnits vara väl korrosionsbeständigt (60).

För jordning av en 400 kV kraftöverföringslinje i Minnesota längs en sträckning av ca 70 mil valdes jordtag med vertikala elektroder av Duriron (gjutjärn med ca 14 % kisel). Koksfillning användes omkring elektroderna för att öka ledningsförmågan till jord (26).

Både kopparklädda och förzinkade jordningslinor ('counterpoise') används vid kraftstationen Colstrip i Montana. Den äldsta, kopparbelagda, jordningslinan installerades ca 1970. Anläggningen övergick till 500 kV 1983. Sedan skador på förzinkade ståldelar och korrosion på fästbultar i fundamenten uppmärksamhetsförsågs master och fästbultar med katodiskt skydd genom magnesiumanoder. På senare byggda linor används förzinkade jordningslinor och dessutom magnesiumanoder för att skydda fästbultar och mastfundament. Anoderna har beräknats ha en livstid av 25 år. 1995 undersöktes fästbultarna med ultraljud utan att ytterligare korrosion noterades. Korrosionsskador på konstruktionen har inte noterats senare (2001) och zinkbeläggningen uppges vara i utmärkt skick (43).

Nikolakos (33), (34) beskriver installation av jordningssystem av kolstål med katodiskt skydd för en 600 MW-anläggning i Kina. Kostnaden för jordning med koppar beräknades bli ca 15 gånger högre. Stål har använts för jordning i Kina i över 30 år, dock med vissa problem i områden med starkt korrosiv jord. P.g.a. lågresistiv jord i den aktuella anläggningen (12-15 Ω m på aktuellt djup) och risken för korrosionsceller orsakade av varierande luftning beslutades att installera katodiskt skydd. Även risken för korrosionsceller orsakade av skillnad mellan nyinsatt respektive exponerat stål påpekas. Enligt Li, Ma & Dawalibi (55) ersätts stål i allt större utsträckning med koppar i bl. a Kina.

Bell & Ferrell (38) beskriver val av jordning och jordledare för en transformatorstation (138 kV) där koppars inverkan på det katodiska skyddet på övriga installationer inte bedömdes vara acceptabelt. Traditionell kopparjordning skulle förbruka 60-80 A extra pålagd ström. Efter granskning av zinkbelagd koppar och zinkbelagt stål som elektrodmaterial, liksom andra tekniska lösningar som elektrisk isolering av kopparjordningen från övriga delar, valdes jordelektroder av zinkbelagt stål (stålkärna $\varnothing$ 1,83 cm).

För att undvika kopparjordningens negativa effekter på katodiskt skydd av närliggande kolstålskonstruktioner har Sneath & Munro (49) sökt alternativ till traditionell kopparjordning i en anläggning för komprimering av naturgas. Koppar med tennbeläggning eller kiseljärn var, med utgångspunkt från polarisationsdata i luftad jord, tänkbara alternativa material. Kiseljärn (kiselhaltigt gjutjärn) valdes på grund av dess mycket låga korrosionshastighet i praktiskt taget alla jordtyper och, jämfört med koppar, mycket bättre galvaniska kompatibilitet med kolstål. I artikeln påpekas att återfyllning omkring elektroderna bör göras med ursprunglig jord, och framför allt inte med koksstybb, där kiseljärn får en potential motsvarande kol eller grafit.

Rural Electrification Agency (REA, USA, nu RUS, Rural Utilities Services) har enligt Kirkpatrick (30) lång erfarenhet av katodiskt skydd för jordelektroder av förzinkat stål i kraftnätet.

Enligt Hirschfeld (37) används rostfritt stål som jordning bl. a i anläggningar för åskskydd. I gällande norm (DIN VDE 0151, (4)) tillåts endast kvaliteten 1.4571, ett titan och molybdenhaltigt kromnickelstål, på grund av risk för lokal korrosion med mer låglegerade ståltyper.

Lewicki & Fowler (36) kritiserar att rostfritt stål får användas för jordelektroder bland annat enligt den övergripande föreskriften för elsäkerhet i USA, National Electrical Code (NEC), utan att typen av stål specificerats. Risken för och konsekvenserna av lokala korrosionsangrepp framhålls som särskilt negativa. I ett tillägg i artikeln noteras att NEC efter revision fortsatt tillåter rostfria stål som jordelektrodmaterial, med hänvisning till att kolstål av motsvarande dimensioner accepterades.

Kolstål ingjutet i betong är enligt DIN VDE 0151 (4) acceptabelt som yttjord-elektrod. Jämfört med stål eller förzinkat stål direkt i jord, blir risken för galvanisk korrosion vid kontakt med koppar i andra delar av jordningssystemet mindre, jämför Figur 5, sid. 16.

Som fyllningsmaterial omkring jordelektroder marknadsförs för ändamålet framtagen speciell cement med hög ledningsförmåga för att förbättra strömledningen till jord, se Figur 9. Ingjutningen i betong eller cement ska då också fungera som korrosionsskydd för jordelektroder av stål eller förzinkat stål. Om jordelektroder av koppar används ska ingjutningen minska den galvaniska effekten från koppar (58) (61). En typ av ingjutna jordelektroder är kända under namnet Ufer Ground.



Figur 9 Läggningslinan (koppar) i ledande betong och närbild av inbäddad jordningslina (Sanearth Technical Review, (58))

8 Diskussion

Svenska kraftnät anger ca 45 år som förutsedd livslängd för jordningssystem. En kopparlina i jord har beräknats korrodera av först efter ca 400 år medan uppskattade livslängder, för jordningssystem, på mellan 15 och 50 år uppges i litteraturen och av företag. Det bör således vara möjligt med alternativ som har betydligt kortare livslängd än nu använda kopparlinor.

Undersökningar av alternativa material för jordelektroder utomlands har nästan uteslutande fokuserats på risken för galvanisk korrosion från jordtag av koppar, och störningar och ökat strömbehov i katodiska skydd för närliggande anläggningar.

Flertalet undersökningar rör djupjordtag, endast i ett fåtal fall behandlas markförlagda jordningslinor. Koncentrerade lokala angrepp som minskar den mekaniska hållfastheten är en klar riskfaktor. För en jordningslina bedöms ett kritiskt område vara markbandet, där lokala angrepp, förutom den mekaniska hållfastheten, ger strömförträngningar i ett kritiskt område.

Egenskaper hos de material som används eller föreslås i det genomgånga underlaget sammanfattas och kommenteras i Tabell 10.

Tabell 10 Använda/i litteraturen föreslagna material i jordningssystem i jord

Material	Egenskaper / kommentarer
Koppar	”Standardmaterial”, goda korrosionsegenskaper, stöldbegärligt, orsakar galvanisk korrosion på stål, förzinkat stål, aluminium m.m. i kontakt ⇒ gnistgap krävs, risk för närliggande konstruktioner. Stöldbegärlig.
Blybelagd koppar	Olämplig ur miljösynpunkt.
Förzinkad koppar	Orsakar ej galvanisk korrosion så länge beläggning är intakt. Dock begränsad livslängd hos beläggningen, därefter galvanisk korrosion som med koppar.
Tennbelagd koppar	Korrosionshårdighet motsvarande koppars. Jämfört med koppar mindre katodisk mot stål, dock uppges riskerna för galvanisk korrosion i jord vara desamma. Vid växelströmspåverkan risk för angrepp på koppar i porer i beläggning.
Kopparbelagt stål	Samma galvaniska korrosionsrisker som med koppar. Accelererad korrosion av stål i beläggningsskador.
Koilstål	Vanligt alternativ till koppar. Ej galvaniska risker. Korroderar i jord (hastighet beroende på jordtyp).
Koilstål klädd med rostfritt stål (304)	Rekommenderat enligt NACEs exponering; oklart om faktiskt genomslag på marknaden; risk för accelererad korrosion i skador
Förzinkat stål	Allmänt använt alternativ till kopparlinor. I vissa jordar kort livslängd för zinksiktet, sedan korrosionsegenskaper som för obelagt stål. Används katodiskt skyddat.
Blybelagt stål	Olämpligt ur miljösynpunkt. Galvaniska risker mindre än med koppar. Bly korrosionsbeständigt i jord, dock viss korrosionsrisk i alkaliska jordar.
Förtent stål	Korrosionshårdigt i de flesta miljöer men i dåligt luftade jordar med hög halt organiskt material. Ädlare än stål varför risk för angrepp i porer i ytskikt föreligger. Jämfört med koppar är tenn mindre katodiskt i förhållande till stål. Kan finnas risk för inverkan av växelström (metall med skyddande oxidskikt).

Material	Egenskaper / kommentarer
Aluminerat stål	I många jordar mer korrosionshärdigt än zink. Kan inte fogas ihop med befintliga kopparlinor. Känsligt för växelströmskorrosion. Ställer högre krav på anslutningar, t.ex. mot stolpe, än koppar eller förzinkat stål (p.g.a. kryp och oxidskiktets egenskaper).
Kiseljärn	God korrosionshärdighet i jord. Sprött, ej lämpat för tråd/lina
NiResist, Duriron	God korrosionshärdighet i jord. Ej galvaniska risker. Sprött, ej hållfasthet för tråd/lina.
Rostfritt stål	Viktigt välja stål med god härdighet mot lokal korrosion. Kan skarvas med koppar. Risk för växelströmskorrosion. Dålig ledningsförmåga ⇒ större dimensioner. Dyrt, risk för stöld.
Zink (gediget)	Orsakar ej galvanisk korrosion. Tveksamt om hållfast för längre distanser. Korrosionshärdighet beroende av jordtyp. Förbrukas vid galvanisk koppling till stora stålytor.
Aluminium	Allmänt förbud / avrådande mot användning i jord, främst beroende på bristande korrosionshärdighet. Dock finns även goda erfarenheter rapporterade. Känslig för lokal korrosion, ev. risk för korrosion p.g.a. inducerade växelströmmar. Orsakar inte galvanisk korrosion i nämnvärd grad. Risk för galvanisk korrosion av aluminium i kontakt med koppar i övriga delar av jordningsnätet). Befarat högt övergångsmotstånd mot jord med tiden
Aluminiumlina med stålkärna	Aluminiumlina med stålkärna provad i jord med uppgivet gott resultat. Se f.ö. aluminium.
Magnesium	Dåligt korrosionshärdig i jord. Finns ej som tråd/lina. Orsakar ej galvanisk korrosion, förbrukas som offeranod vid kontakt med stål.
Stål eller förzinkat stål i betong	Stålet skyddas av betongen, skyddas även mot galvanisk korrosion i kontakt med koppar.

En möjlighet skulle vara att använda linor av förzinkat stål i kombination med offeranoder i speciellt korrosiva områden och i känsliga delar – t.ex. i markbandet.

9 Slutsatser

Något enskilt material som i samtliga aktuella miljöer kan ersätta koppar i jordningslinor, med en livslängd motsvarande koppars, har inte påträffats i litteraturen. Olika lösningar får tas till, beroende på lokala förhållanden och krav.

Koppar och alternativa material

Koppar i jordningslinor har mycket goda egenskaper ur ledningssynpunkt och med avseende på korrosionsegenskaper i jord.

Material med samma genomgående höga korrosionshårdighet som koppar och i övrigt motsvarande materialkraven finns sannolikt inte på kort sikt. Det närmaste tänkbara alternativet bland gedigna material torde vara mycket höglagerade rostfria stål med begränsad risk för lokala angrepp. Det höga priset kan dock även där medföra stöldrisk.

Kopparklätt stål används bland annat i jordspett och även lina. I första hand utnyttjas där koppars korrosionshårdighet. Korrosionshårdigheten kommer, under beläggningens livstid, i stort sett att motsvara den för koppar, liksom de elektrokemiska egenskaperna. Att märka vid belagda material är dock risken för accelererade angrepp på underliggande material i skador i en beläggning av ädlare material. Om det kopparbelagda materialet inte mycket tydligt särskiljs från gediget koppar kvarstår dessutom stöldrisk.

Problem med galvanisk korrosion på omgivande konstruktioner i jord, som drivit fram behov av alternativa material utomlands, har varit mindre i Sverige än t ex i USA. I och med att gnistgap överbryggas förväntas galvaniska korrosionsskador dock öka även i Sverige, i det fallet drabbas främst kraftledningss Stolparnas stag.

Förzinkat stål har generellt varit huvudalternativ till koppar med hänsyn till risken för galvanisk korrosion.

Risk - konsekvensbedömning

Koppar har i många lägen sannolikt till och med haft en överkvalitet i fråga om korrosionshårdighet. Jordningslinor av förzinkat stål har installerats tidigare i Sverige, men ersatts med kopparlinor på grund av korrosionsskador. Korrosionskänsligare material, som förzinkat stål, behöver användas med större anpassning till funktionskrav och aktuell miljö.

En klarare bild av konsekvenserna för jordningssystemet av korrosion i olika former och på olika delar av jordningslinan behövs för att värdera alternativa material. Korrosionshårdighet, korrosionsrisker, livslängd och eventuella skyddsåtgärder kan då bedömas tydligare i relation till nödvändiga funktioner. Särskilt utsatta delar kan skyddas.

Möjligheter – fortsatt arbete

Tillförlitliga korrosionsdata för Sverige finns från långa exponeringar av olika metaller för projektering av livstider för jordningslinor. Korrosivitet på specifika lokaler kan tas fram. Nödvändig tjocklek på zinksikt kan beräknas. Omfattningen av påtagligt korrosiva områden, där ytterligare åtgärder är nödvändiga, kan bedömas.

Det är möjligt att göra lokala bedömningar och anpassningar för alternativa material: dimensionering, olika beläggningstjocklekar, lokala offeranoder.

Som utgångspunkt föreslås en kartläggning av de delar i jordningssystemet där korrosionsangrepp har störs inverkan på funktionen, vilket bör ge en klarare bild av vilken typ av korrosion som i första hand begränsar livslängden. Dessutom föreslås, i den mån detta inte redan är gjort, en översikt av korrosiviteten i jord inom kraftledningsnätets områden, för i första hand zinkbelagt kolstål. Från detta kan en bedömning göras av hur alternativa material i kombination med skyddsåtgärder kan ge en livslängd motsvarande kraven. Som alternativ bör följande material, angivna i preferensordning, undersökas vidare, framförallt genom fältprov:

- Förzinkad ställina i kombination med lokala offeranoder i känsliga områden (i vissa jordar samt i markbandet)
- Aluminerad ställina
- Förtent ställina

Andra material med lovande korrosionsegenskaper, använda i jordningssammanhang, t.ex. kiseljärn, kräver materialutveckling för att kunna fås som tråd eller band, om det ens är möjligt.

10 Referenser

- (1). SS-EN 50341, Elektriska friledningar över 45 kV (AC) - Overhead electrical lines exceeding AC 45 kV. Utg 2, 2007. SEK & SIS, Stockholm, 2007.
Avsnitt 6, Earthing systems, s 139 – 148.
Annex G, avsnitt G2, Minimum dimensions of earth electrode materials ensuring mechanical strength and corrosion resistance.
Annex H avsnitt H2.2. "Resistance to earth"
- (2). Svenska Kraftnät: Tekniska riktlinjer för ledningar, SvK TR 5, <http://www.svk.se/web/Page.aspx?id=5637>
SvK TR 5:113, Jordningar (2000-09-14), 20 s. (Engelsk version: Tr5:113E, Earthing)
http://www.svk.se/upload/3713/13_JORDN_TR5_1.pdf
- (3). Starkströmsföreskrifterna. Föreskrifter och allmänna råd. Elsäk FS 1999:5, Elsäkerhetsverket, Stockholm.
http://www.elsak.se/download/18.60a759a611147b1cd6180004381/1999_5.pdf (2007-10-02)
Avd A, Kapitel 54, Jordning , s 120 – 129. Avd. B: §B75 - B76, Utförande av jordning.
- (4). DIN VDE 0151. Material and minimum dimensions of earth electrodes with respect to corrosion. DIN / Beuth, 1986, 10 s.
- (5). prEN50114:1993. Materials and size requirements for earth electrodes from the corrosion point of view, Draft Jan 1993. CENELEC, 1993. 23 s.
- (6). New Zealand Code of Practice for Power Systems Earthing. NZECP 35:1993. ISSN 0114-0663. Ministry of Economic Development, New Zealand, 1993, 23 s.
http://www.energysafety.govt.nz/upload/33449/nzecz35_1993.pdf
- (7). Guide for transmission line grounding: A roadmap for design, testing and remediation. EPRI Technical Report, EPRI 10001021. 2004. - Tidigare utgåva: Dawalibi, F: Transmission line grounding, vol 1. EPRI, 1982, 432 s.
- (8). National Electric Code (NEC), USA. National Fire Protection Agency (NFPA). Ny utgåva varje år.
- (9). IEEE standard 1048-2003. Guide for protective grounding of power lines. IEEE, 2003.
- (10). Recommended practice for grounding of industrial and commercial power systems. IEEE Standard 142-2007. (IEEE Green Book). IEEE. 2007, 234 s.

- (11). Charlton, T: Earthing practice. CDA publication 119, 1997.
Innehållsförteckning:
<http://www.cda.org.uk/Megab2/elecapps/earthing/index.htm>
Section 41, Earth electrodes
<http://www.cda.org.uk/megab2/elecapps/earthing/sec41.htm>
- (12). Ghesquiere, J D: Cathodic protection and zinc grounding in industrial plant construction. Corrosion 1961, vol 17, nr 3, s 148t – 153t. 9 ref.
- (13). Driven ground rod test program. A progress report of NACE Task Group T-4A-3. Corrosion 1961, vol 17, nr 7, s 365t – 366t. 0 ref
- (14). Abbott, W K & Schillmoller, C M: Survey of electrical grounding problems, Materials Protection 1962, vol 1, nr 11, s 48 – 60
- (15). Driven ground rod test program. A status report of NACE Task Group T-4A-3 on Methods and Materials for Grounding. Materials Protection 1963, nr 5, s 95 – 100
- (16). Abbott, W K & Schillmoller, C M: New materials for electrical grounding, Materials Protection 1963, vol 2, nr 4, s 22 – 29
- (17). Driven ground rod test programme, 2nd status report of NACE Technical Committee T-4A. Materials Protection vol 4, 1965, nr 12, s 75 – 83.
- (18). Driven ground rod test programme: 3-year test data. Materials Protection Performance 1970, nr 9, s 62 – 64
- (19). Drisko, RW & Hanna; A E: Field testing of electrical grounding rods. Final report, July 1962 – July 1969. NTIS rapport nr AD0702040, 1970, 66 s.
- (20). Bagnall, G J: Corrosion control and electric distribution system grounding. Proc. 21st Annual Appalachian Underground Corrosion Short Course, 1976, s 219 – 237 (WVU Engineering Exp. Station Bulletin no. 108)
- (21). Chaker, V: Corrosion problems caused by bare copper grounding. Corrosion/79, March 1979, Atlanta. Föredrag nr 56, 17 s.
- (22). Tanaka, A & Terada, S & Miyake, Y: Properties and applications of various AS (aluminum-clad steel) wires. Wire Industry, 1981, vol 48, no. 570, s 405-408, 410.
- (23). Heim, G: Eigen- und Kontaktkorrosion von Erderwerkstoffen ohne und mit überlagerten Wechselströmen. Entscheidungshilfe für die Wahl von Erderwerkstoffen zur Einschränkung bzw. Vermeidung von Korrosionsgefahren. Projekt Nr. 5.7/1. Werkstoffe Korrosion, 1982, vol 33, s 512 – 513.
- (24). Heim, G: Korrosionsverhalten von Erderwerkstoffen. Elektrizitätswirtschaft 1982, vol 81, nr 25, s 875 – 884. 8 ref.
- (25). McIntosh, D H: Grounding in corrosive areas. Electr. Constr. Maint. (EC&M) 1983, May, s 65 – 67. 0 ref.

- (26). Takle, J A: CU $\pm$ 400 kV transmission project. Corrosion/83, April, 1983, Anaheim. Föredrag nr 321, 5 s. 0 ref.
- (27). Mee, M & Torrance, A: Investigation into the corrosion of steel cored aluminium conductor (S.C.A.C.) used as buried earth electrode by the E.S.B. in Ireland. I: Environmental problems in Materials Durability. IFDC 1, Dublin, Mar 1983. Publ. 1984, Parsons Press, Dublin. S 219 – 226. 11 ref.
- (28). Bertling, T & Dischner, JH & Heim, G: Corrosion behaviour of earthing materials. International Conference on Large High Voltage Electric Systems, 1984 Session. Föredrag 36-02, 6 s. 8 ref.
- (29). Sen, P: Steel grounding. 6 s. I: IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, Denver, 1985. IEEE, Denver, 1985. (R)
- (30). Kirkpatrick, E L: Alternatives to copper grounding in sites requiring cathodic protection. Corrosion/86, March 1986, Houston. Föredrag nr 341, 6 s. 14 ref.
- (31). Kirkpatrick, E L: Alternatives to copper grounding in sites requiring cathodic protection. Mat. Perf. 1986, vol 25, nr 9, s 17 – 19. 14 ref.
- (32). Paul, H-U: Korrosion von Erdungsanlagen und korrosive Beeinflussung. Elektrizitätswirtschaft 1987, vol 86, nr 4, s 120 – 123. 4 ref.
- (33). Nikolakakos, S: Corrosion and cathodic protection of a steel grounding system in a power plant in the Peoples Republic of China. Corrosion/88, March 1988, St. Louis, 1988. Föredrag nr 232. 10 s. 3 ref.
- (34). Nikolakakos, S: Corrosion and cathodic protection of steel grounding systems. Materials Performance 1988, vol 27, nr 7, s 11 – 15. 3 ref.
- (35). Zhang, L S: 500 kV line across the River Yangtze. Wire Ind., 1990, vol 57, nr 2, s 92 – 96. 7 ref. (jordledning i luft)
- (36). Lewicki, T F & Fowler, N L: The effect of corrosion myths on national electrical standards. IEEE Transactions on Industry Applications, 1993, vol 29, nr 5, s 1006 – 1011. 9 ref.
- (37). Hirschfeld, D: Rostfreie Edelstahl im Erdboden. Oberflächen – Polysurface 1998, nr 3, s 18 – 23. 15 ref.
- (38). Bell, K & Ferrell, B A: Grounding with zinc-steel conductors in high voltage electric compressor stations. Corrosion 2001 (NACE), March 2001, Houston. Föredrag nr 01603. 15 s. 0 ref.
- (39). Petersson, M & Björn, R-M: Mätmetoder för att kontrollera jordlinesystem. MSI Rapport 01025, Växjö Universitet, Matematiska och Systemtekniska Institutionen, 2001. 25 s. 12 ref.
<http://vxu.se/msi/forskn/exarb/2001/01025.pdf>
- (40). Kirkpatrick, E: Electrical grounding and cathodic protection issues in large generating stations. Mat. Perf. 2001, vol 40, nr 11, s 17 – 19. 3 ref.

- (41). Ein Beitrag zur rechnerischen Bestimmung von Erdungsimpedanzen, Erdungsströmen und Erdungsspannungen von elektrischen Anlagen in Netzen mit niederohmiger Sternpunktserdung", A. Gabbauer, Diplomarbeit, Graz, 2001
- (42). Korrosionsverhalten von feuerverzinktem Stahl, Merkblatt 400, Stahl-Informationszentrum, Dusseldorf, 2001 (http://www.stahl-info.de/schriftenverzeichnis/pdfs/MB400_2004_ueberarbeitet.pdf)
- (43). Pre-Effective Amendment to Registration of Securities Issued in a Business-Combination Transaction, PPL Montana LLC - S-4/A · On 2/20/01. 368 s. - Colstrip Transmission System, s 172 – 175.
<http://www.secinfo.com/dsvr4.41Hy.htm#dk04>
- (44). Osotov, V N & Abramov, A B & Bykov, A V: Experience of a complex study of overhead transmission lines. Power Technology & Engineering, 2002, vol 36, nr 3, s 154 – 156. 5 ref.
- (45). Kirkpatrick, E L: Electrical grounding case histories. Corrosion 2003 (NACE), March 2003, San Diego. Föredrag nr 03701. 9 s. 15 ref.
- (46). Rempe, C: A technical report on life expectancy of ground rod electrodes, Erico, 2003, 10 s
<http://www.erico.com/public/library/fep/strike/LT0540.pdf>
- (47). Korrosion in Zusammenhang mit Blitzschutz-Systemen, ABB Merkblatt 9, 2003, http://www.vde.de/NR/rdonlyres/DBD2D238-A48D-43BD-BDF8-D3330DB5C011/19847/abb_mb9_korrosion.pdf
- (48). Gummow, R A: Cathodic protection current requirements for electrical grounding materials. Corrosion 2004 (NACE), March 2004, Houston. 17 s. 17 ref.
- (49). Sneath, O & Munro, I: Silicon iron as an alternative to copper grounding electrodes – impact on cathodic protection. Materials Performance 2004, vol 43, nr 12, s 20 – 24. 7 ref.
- (50). Markiewicz, H & Klajn, A: Earthing systems – Basic constructional aspects. 12 s. Del 6.5.1 i serie Earthing & EMC. Copper Development Association (CDA).
<http://repository.copperwire.org/Library/PQGuide/6.Earthing/6.5.1%20Earthing%20Systems%20Basic%20Constructional%20Aspects.pdf>
- (51). Svenska Kraftnät, Sammanträdesprotokoll 3 2005 (2005-11-17), s 3-4
www.svk.se/upload/4387/Protokoll_3_2005.pdf
- (52). Grounding products and systems, 84 s. Erico Inc., 2006.
<http://www.erico.com/public/library/fep/LT0359.pdf>
- (53). Forssander, M: Korrosion i jord av jordningslina av koppar. Rapport till Svenska Kraftnät 2006-12-06 (TerraCorrosion AB), 18 s. 13 ref.
http://www.svk.se/upload/3774/Kopparrapport_07.pdf (Svenska Kraftnät, 2007-09-20)

- (54). Lennart Karlsson, Göteborg Energi, personlig kommunikation.
- (55). Li, Y & Ma, J & Dawalibi, FP: Power grounding safety: copper grounding systems vs. steel grounding systems. 6 s. I: POWERCON Conference, Chongqing, Oct 2006.
- (56). Boden, P & Skuggevig, W: The grounding electrode. IAEI Magazine, Sept – Oct 1998. http://www.iaei.org/subscriber/magazine/98_e/boden.htm
- (57). Lindsey, T: National electric grounding research project. Technical report. Fire Protection Research Foundation, Quincy, MA, 2007. 136 s. <http://www.nfpa.org/assets/files//PDF/Research/NEGRPFinalReport.pdf> (2007-10-03)
Korrosion s 117 – 120 & Bilaga 11.3 (bilagan separat dokument, ej elektroniskt tillgänglig).
- (58). Practical measures for lowering resistance to grounding. San-Earth Technical Review. Sankosha Co., 39 s. <http://www.sankosha-usa.com/pdf/san-earth-tech.pdf>
- (59). Edison Electric Institute (EEI), News & Trends, March/April 2003, Getting grounded
www.eei.org/magazine/editorial_content/nonav_stories/newstrendsmarch03.htm (Om EPRIs exponering av jordelektroder)
- (60). Vinka, T-G, KIMAB, personligt meddelande, okt 2007.
- (61). Hallmark, C L : The use of conductive cement to extend and protect made ground electrodes. AREMA 2000 Annual Conference Proceedings, 2000, föredrag 00057. 18 s. 11 ref
http://www.arena.org/eseries/scriptcontent/custom/e_arena/library/2000_Conference_Proceedings/00057.pdf
- (62). Barahona Abrego, C J & Cideos Morales, RH & Marroquin Arevalo, C R.: Manual para aterrizaje en subestaciones y sistemas electricos. Trabajo de graduacion. Universidad Albert Einstein, La Libertad, 2003. 273 s.
http://ewh.ieee.org/r9/panama/capitulos/ias/files/Manual_puesta_tierra.pdf
- (63). Koertz, H C & Wetzler, J M: Literature survey on corrosion of underground metallic structures induced by alternating currents. 2001, 18 s. European Copper Institute & KEMA.
<http://eurocopper.org/doc/uploaded/File/LitSurv.pdf>
- (64). Lars Troselius, Korrosions- och Metallforskningsinstitutet, muntlig information.
- (65). Vinka,T-G: Korrosion på metaller i svenska jordar - sammanställning av resultat från fältexponeringar och praktiska erfarenheter. VA-Forsk Rapport 2003:34. Svenskt Vatten AB, Stockholm 2003. 119 s.

- (66). Johansson, M: Korrosion på rostfria stål i jord. Litteraturundersökning. Examensarbete i korrosionslära vid Avdelningen för korrosionslära, KTH, utfört vid Korrosionsinstitutet, Stockholm. Stockholm: Avdelningen för korrosionslära, KTH & Korrosionsinstitutet, 1997. 45 s.
- (67). T-G. Vinka: Korrosion på vertikala konstruktioner av kolstål och rostfritt stål i jord, arbetsrapport, december 1996, Korrosionsinstitutet, Stockholm
- (68). G. Camitz, T-G. Vinka: Corrosion of aluminium in Swedish soils. NKM 11, 11th Scandinavian Corrosion Congress, Stavanger, 1989. Föredrag F-33. 6 s. (Publ: Hoegskolesenteret i Rogaland, Stavanger, 1989)
- (69). Olsson, A & Vaerneus, A & Zerpe, R: Korrosion på aluminium i jord. Specialarbete i metalliska material vårterminen 1992. Korrosionsinstitutet, 1992, 20 s.
- (70). Johansson, T: Korrosionshårdigheten hos beläggningar av aluminium, zink och deras legeringar. Resultat av elva års exponering i jord. KI Rapport 1992:4. Korrosionsinstitutet, Stockholm, 1992. 37 s
- (71). Sjögren, L, Korrosionshårdigheten hos beläggningar av zink, aluminium och deras legeringar, slutrapport. KI rapport 2001:1. KI, Sthlm, 2001. 46 s.
- (72). Vinka, T-G: Bedömning av korrosionsrisk: Korrosion på förzinkat stål i jord. Bygg & teknik, årgång 92, 2000, nr 1, s 55-58
- (73). Romanoff, M: Underground corrosion. NBS, Washington, 1957. 227 s. (NBS Circular 579; NTIS PB168350)
- (74). Harris, J O & Eyre, D: Soil in the corrosion process, avsnitt 2.5, s 2.73 – 2.86 i:
L L Shreir, R A Jarman & G T Burstein (eds), Corrosion, 3e utg, Butterworths, London, 1994.
- (75). Elsner, G: Soil (Underground corrosion), s 238 – 330 i : DECHEMA Corrosion Handbook, vol 2. VCH, 1988. 470 ref.

Bilaga 1

Sammanställning av material och dimensioner för yttjordelektroder (jordningslinor, tråd, band) i standarder

Standard	Koppar	Koppar, tennbelagd	Koppar, zinkbelagd
SS EN 50341 Tab G1	+ <i>Lina</i> , 'stranded cable' Yta 25 mm ² , kardel Ø 1,8 mm	+ <i>Lina</i> , 'stranded cable' Yta 25 mm ² , Ø kardel 1,8 mm; Sn 5 µm	+ <i>Band</i> , 'strip' Yta 50 mm ² , min 2 mm tjock; Zn 40 µm
SS EN 50341 Tab 6.2.2.1/SE1	+ <i>Lina</i> , 'wire'	-	-
SvK 5:113	+ <i>Lina</i> , 'jordledare yttjordtag'	-	-
Elsäk FS 1999:5 B75	+ <i>Lina</i>	-	-
VDE 0151 tabell Erdleiter	+ <i>Lina</i> , 'Seil' Yta 50 mm ² , kardel 1,7 mm <i>Tråd</i> 'massives Rundmaterial' Yta 50 mm ² , Ø 8 mm <i>Band</i> , 'massives Flachmaterial' Yta 50 mm ² , min 2 mm tjock	+ <i>Tråd</i> , 'massives Rundmaterial' Yta 50 mm ² , Ø 8 mm Sn ? µm	+ <i>Band</i> , 'massives Flachmaterial' Yta 50 mm ² , min 2 mm tjock; Zn ? µm
prEN 50114 Tab 1	+ <i>Lina</i> , 'Rope' Yta 35 mm ² , kardel Ø 1,8 <i>Tråd</i> , 'round rod for less deep electrodes' Yta 35 mm ² <i>Band</i> , 'strip' Yta 50 mm ² , min 2 mm tjock	+ <i>Lina</i> , ('rope') Yta 35 mm ² , kardel Ø 1,8; Sn 5 µm	+ <i>Band</i> , (strip) Yta 50 mm ² , min 2 mm tjock; Zn 40 µm

Lina – flertrådig ledare, 'wire' 'rope' etc

Tråd – entrådig ledare 'Thread', 'Draht' etc

Band – ledare med rektangulärt tvärsnitt, 'strip'

Yta betecknar i alla förekommande fall tvärsnittsytan.

Måtten är minimidimensioner

*¹bara helt inbäddad i betong

*² Rostfritt stål nämnt i text som exempel på alternativ förutsatt att kraven i normen uppfylls

*³ Lämpliga kvaliteter rostfritt stål anges i text; inga dimensionsuppgifter

Sammanställning av material och dimensioner för yttjordelektroder (jordningslinor, tråd, band) i standarder, fortsättning.

Standard	Kolstål, bart		Kolstål, förzinkat		Kolstål, kopparbe- lagt	Kolstål, blybelagt		Rostfritt stål
SS EN 50341 tab G1	-		+	<i>Tråd</i> , 'round bar for surface earth electrode' Ø 10 mm, Zn 50 µm <i>Band</i> , 'strip' Yta 90 mm ² , 3 mm tjock, Zn 70 µm	-	+	<i>Lina</i> , 'round wire for surface earth electrode' Ø 8 mm, Pb 1000 µm ('sheath')	* 2
SS EN 50341 Tab 6.2.2.1/SE1	+	<i>Lina</i> , wire			-			2
SVK TR 5:113	-				+	<i>Lina</i> , 25 mm ² , 0,12 mm Cu		-
Elsäk FS 1999:5 § B75	-	?	+	<i>Lina</i>	+	<i>Lina</i> <i>Tråd</i> , 25 mm ² , 0,12 mm Cu		-
DIN VDE 0151 Tab 'Erdleiter'	+	<i>Tråd</i> *1, 'massives Rundmaterial', Ø 10 mm <i>Band</i> , 'massives Flachmaterial' Yta 75 mm ² , min 3 mm tjock	-		-			+
prEN 50114:1993 Tab 1	-		-		-			3

Lina – flertrådig ledare, 'wire' 'rope' etc
Tråd – entrådig ledare 'Thread', 'Draht' etc
Band – ledare med rektangulärt tvärsnitt, 'strip'

Yta betecknar i alla förekommande fall
tvärsnittsytan.
Måtten är minimidimensioner

*1 bara helt inbäddad i betong
*2 Rostfritt stål nämnt i text som exempel på alternativ
förutsatt att kraven i normen uppfylls
*3 Lämpliga kvaliteter rostfritt stål anges i text; inga di-
mensionsuppgifter