

Korrosion i jord av jordningslina i koppar

Författare

Märit Forssander

Uppdragsgivare: Svenska Kraftnät

Att: Thomas Bensenfelt / Lillemor Carlshem

Ärende: Korrosion i jord av jordningslina av koppar

Handläggare: Märit Forssander, marit.forssander@terracorrosion.se

Reg nr: 060709

Datum: 2006-12-14

Sammanfattning

En ca 40 mil lång 400 kV-ledning ska byggas mellan Hallsberg och Skåne. Om den byggs som luftledning är det planerat att en långsgående jordningslina ska installeras. Denna kommer att bestå av kopparlina i antingen dimensionen 70 eller 52 mm². I samband med projekteringen uppkom frågan huruvida denna kommer att vara en miljöfara på grund av korrosion av koppar.

Provningar som utförts med avseende på koppars korrosionshastighet i jord utförda av Korrosionsinstitutet har studerats tillsammans med litteratur om koppars miljöfarlighet.

Resultatet är att korrosionen av kopparlinan utgör ett mycket litet bidrag till jordens naturliga kopparinnehåll. Mest realistiskt kommer en lägre mängd än 49 g per 100 meter lina att läcka ut varje år i början för att därefter avta med tiden. Det kommer att ta mer än 400 år innan linan korroderar av. Den lilla mängd koppar som frigörs kommer snabbt att bindas upp till svårslösliga komplex tillsammans med organiska och oorganiska ämnen i jorden och kommer därför inte att vara biotillgängligt för upptag av växter och djur, framför allt inte längre från linan än några centimeter. Eftersom linan kommer att vara placerad under den del av jorden som brukas kommer frigjord koppar inte att nå de växter som odlas. Så småningom kommer regnvattnet att transportera iväg de svårslösliga komplexen som då hamnar i grundvattnet och vidare till recipienter, fortfarande som svårslösliga komplex som inte är biotillgängliga för växter och djur. På vägen kommer utspädningseffekten dessutom att bli enorm.

Innehåll

1 Inledning och bakgrund.....	4
2 Utförande.....	4
2.1 Litteraturstudie	4
2.1.1 Allmänt om koppar.....	4
2.1.2 Hälsa och miljö.....	5
2.1.3 Koppar inom jordbruket.....	8
3 Korrosion i jord av koppar	9
3.1 Hur mycket koppar kan förväntas komma ut i jorden från kopparlinan?	11
3.2 Vad händer sedan?	12
4 Placering av den nya 400 kV-ledningen	12
5 Resultat.....	15
6 Diskussion och slutsatser	17
7 Referenser.....	18

1 Inledning och bakgrund

En ca 40 mil lång 400 kV-ledning ska byggas mellan Hallsberg och Skåne. Om den byggs som luftledning är det planerat att en långsgående jordningslina ska installeras. Denna kommer att bestå av kopparlina i antingen dimensionen 70 eller 52 mm². I samband med projekteringen uppkom frågan huruvida denna kommer att vara en miljöfara på grund av korrosion av koppar.

TerraCorrosion AB fick uppdraget att redogöra för förväntad korrosionshastighet i olika jordarter samt redogöra för förväntade miljöeffekter utifrån den senaste kunskapen inom området.

2 Utförande

Provningar som utförts med avseende på koppars korrosionshastighet i jord utförda av Korrosionsinstitutet har studerats och resultaten sammanfattas i rapporten.

En övergripande litteraturstudie avseende koppars miljöfarlighet utfördes.

2.1 Litteraturstudie

De undersökningar av korrosionshastigheter av koppar i jord som utförts av Korrosionsinstitutet mellan år 1979 – 1986 har granskats.

Resultat från undersökning med avseende på koppars korrosion i jord vid kraftledningsstolpar utförd 1999 utförd av undertecknad redovisas också.

Genom personliga kontakter och med hjälp av internet har undertecknad kommit fram till främst en bok utgiven 2004 (1); "Metals in Society and in the Environment – A critical Review of current Knowledge on Fluxes, Speciation, Bioavailability and Risk for Adverse Effects of Copper, Chromium, Nickel and Zinc". Boken är skriven av Lars Landner, AF-Environmental Research Group, Sverige och Rudolf Reuther, ena Environmental Assessments, Tyskland. I boken redogörs för de senaste årens forskningsresultat (fram till 2004) avseende koppar och dess miljö- och hälsoskadlighet i bland annat jord. Författarna till boken har granskat 369 rapporter, arbeten, böcker och presentationer och måste därför anses vara mycket heltäckande i ämnet. Informationen från denna bok kompletteras med några rapporter och artiklar skrivna bland annat av IVL Miljökonsulterna AB samt Avdelningen för Korrosionslära på KTH. Dessutom redovisas resultat från rapporten "Copper", utgiven av bland annat WHO.

2.1.1 Allmänt om koppar

Koppar är en essentiell metall vilket innebär att alla levande celler behöver små mängder av koppar för att fungera. Till exempel är flera enzymer beroende av koppar (2). Behovet är dock litet och eventuellt överskott kan antingen bindas till molekyler och utgöra reservoar för framtida behov eller för att passivera den fria metalljonens biokemiska aktivitet.

Koppar förekommer i naturen i allmänhet som malm där koppar är bundet till svavel. Vid framställning av ren koppar anrikas malmen i flera steg och man kan till slut få en produkt med ca 99,95 % koppar.

Koppar är en så kallad seg metall och är därför mycket lätt att kallbearbeta och passar mycket bra för att valsas till tunna band eller dras till fin tråd.

De utmärkta elektriska egenskaperna tillsammans med bearbetbarheten och korrosionsresistensen har gjort att den används mycket inom bland annat elektriska anläggningar (vilket är det i världen vanligaste enskilda användningsområdet för koppar). Som exempel kan nämnas att ett enda vindkraftverk idag innehåller upp till 4,4 ton koppar.

Koppar har atomnummer 29 i periodiska systemet och tillhör gruppen ädelmetaller (samma grupp som silver och guld). Detta innebär att den i ren form (som metall) är relativt stabil och vill inte reagera med andra ämnen. Metallen har brukats av människan i mer än 10 000 år och det finns därför mycket lång erfarenhet av materialet.

Koppar förekommer i ett antal olika mineralsalter och organiska föreningar och kan även i naturlig form finnas som ren metall. Den metalliska formen är mycket stabil i naturlig torr luft vid låga temperaturer. I fuktig luft genomgår den en långsam omvandling till hydroxidkarbonat (och hydroxidsulfat vilket ger den karaktäristiska gröna kopparärgen som kan ses på tak i svavelhaltig miljö och som skyddar den underliggande metallen från vidare korrosion).

De två vanligaste formerna av löst koppar i vattenlösningar är valensstadierna +1 och +2 (envärt respektive tvåvärt koppar). Alla kopparjoner med valenstal +1 kommer omedelbart att antingen oxideras (till valenstal +2) av omgivande oxidationsmedel, genomgå en kemisk reaktion eller komplexbildas med omgivande komplex (ligander) vilket stabiliserar molekylerna. Den tvåvärdiga jonen kommer huvudsakligen att bindas till oorganiska ligander såsom vattenmolekyler (H_2O), hydroxidjon (OH^-), karbonatjon (CO_3^{2-}), sulfatjon (SO_4^{2-}), etc eller till organiska ligander. Detta leder till att i naturen kommer den tvåvärdiga kopparjonen att snabbt adsorberas av ett antal hydratiserade metalloxider inkluderande dem med järn, aluminium och magnesium.

Varje reaktion mellan den fria jonen (Cu^+ och Cu^{2+}) och omgivande medium innebär att metalljonen vidare reaktionsförmåga minskar och därmed dess biotillgänglighet.

Varje reaktion står alltid i jämvikt. Med det menas att reaktionen kan gå åt båda håll. Vid så kallad "steady state" sker lika mycket åt ena hållet som åt andra. Detta betyder inte att det finns lika mycket av båda slutprodukterna, jämvikten förskjuts åt ena eller andra hållet. Det sker dock hela tiden utbytbara reaktioner. Åt vilket håll jämvikten förskjuts beror på alla de olika faktorer som kan påverka såsom fukthalt, pH-värde, jordens sammansättning, växtupptag mm mm. Till exempel vid växtupptag kommer det att finnas lägre halter av biotillgänglig form av koppar och då kommer de andra jämvikterna att förskjutas så att biotillgänglig form kan frigöras från till exempel oorganiska komplex.

2.1.2 Hälsa och miljö

Man skiljer mellan hälsoskadliga ämnen och miljöskadliga ämnen. Med hälsoskadliga ämnen menas ämnen som är skadliga för människan. Men miljöskadliga ämnen menas ämnen som är

skadliga för växter och djur där människan inte räknas med. Ofta är ett ämne skadligt för människa, djur och miljö men det finns många ämnen som inte är det. Även halterna av ämnen kan spela stor roll, människan kanske klarar betydligt högre halter av ett skadligt ämne än miljön.

Ett vanligt dagsupptag för en vuxen människa är 0,9 till 2,2 mg koppar. Mängden kan bli betydligt högre om man har egen borrhål och kopparinnehållet högt.

Enligt en lärobok för högskolan från 1983 (3) ger koppar och kopparföreningar endast upphov till akuta förgiftningar. Inga kroniska effekter finns beskrivna. De akuta förgiftningar kan ske när man använder kopparkärl vid matlagning eller från koppar som lakas ut i vattnet från kopparrör. Besvären kan uppkomma vid halter på 1-3 mg koppar per liter vatten och drabbade är främst småbarn då dessa dricker mer vatten i förhållande till sin kroppsvikt än vuxna. Ett inlägg (4) påstår att det finns misstankar om att åtminstone ett svenskt spädbarn har dött på grund av kopparförgiftning på grund av mycket höga kopparhalter från separat borrhål.

Det finns också rapporter om svetsare som inandats kopparhaltig metallrök och som har fått så kallad metallfrossa. Även dessa symtom är övergående.

Idag är denna bild av eventuella skador från koppar något annorlunda. Man söker långtidseffekter av även måttligt förhöjda värden på kopparinnehåll. En förklaring kan vara följande;

I vatten kan koppar förekomma i fyra olika valensstadiet; metalliskt koppar (Cu^0), envärd kopparjon (Cu^+), tvåvärd kopparjon (Cu^{2+}) eller trevärd kopparjon (Cu^{3+}). Att den kan förekomma i flera valensstadiet innebär att den kan bilda fria radikaler. Fria radikaler är extremt reaktiva (och då även extremt kortlivade) men kan om de befinner sig på "fel" ställe, till exempel i en cell just när de är i detta stadium ge skador bland annat på arvsanlagen. (5) Dessa effekter ger verkningar betydligt senare än när själva exponeringen skett.

Koppar (I)oxid har länge använts i båtottenfärger för att förhindra beväxning av djur och växter. I dag är detta egentligen förbjudet, men det pågår en het debatt om det verkligen är så miljöskadligt så att det bör förbjudas.

När man talar om hälso- och miljöeffekter av ett ämne talas ofta om biotillgänglighet, bioaccumulation och begreppet LC_{50} . Här följer en förklaring till dessa begrepp:

Biotillgänglighet

Att ett ämne är biotillgängligt innebär att ämnet är i en sådan form att det kan tas upp av växter eller djur. För koppar gäller att det ingår som jonform där koppar får ha valensstalet +1 eller +2. Observera att bara för att ett ämne är biotillgängligt behöver det inte nödvändigtvis vara toxiskt.

Bioaccumulation

Med bioaccumulation menas nettoupptaget av koppar (hur mycket kopparhalten ökar) av mikroorganismer, grödor, eller djur från omgivningen (vatten, sediment, jord och föda). Bioaccumulation av koppar är möjlig när kopparn föreligger i biotillgänglig form. Ackumuleringen leder till att halten ökar i kroppen. Det är då till slut möjligt att halten blir så hög att den utgör en fara för individen. Många organismer är dock kapabla att ta hand om dessa halter.

LD₅₀

LD₅₀ står för vilken halt av ett ämne i en kropp som krävs för att hälften av populationen (ofta möss) man provar på ska dö.

För koppar(I)oxid anger (3) LD₅₀ lika med 470 mg/kg kroppsvikt.

LC₅₀

LC₅₀ står för vilken halt i omgivande lösning som leder till att 50 % av populationen av en viss art dör.

I litteraturen finns sedan ett mycket stort antal exempel från LC₅₀-värden för olika organismer och olika miljöer, de flesta utförda i kontrollerade laboratorieförsök. Man måste också ange tidsperspektivet för experimentet. Nedan följer några exempel:

LC₅₀ Fisk 96h: 0,000597 mg/l

LC₅₀ Daphnia 48h: 0,00025 mg/l

LC₅₀ Alger 72h: 0,0000002 mg/l

Analysmetoder

De halter av olika ämnen som är miljö- och hälsofarliga kunde inte mätas förr på grund av att analysmetoderna inte var tillräckligt noggranna. I och med att analysmetoder har utvecklats för att kunna mäta allt lägre halter kan man komma ner i de halter som är miljö- och hälsofarliga. Med utveckling av analysmetoderna har också många gånger de gränsvärden som angetts för ett ämne minskat. Som exempel kan nämnas arsenik i brunnar. Först på senare tid kan man analysera så låga halter som kan anses vara hälsoskadliga. Förr kunde man ju inte ange ett maxvärde eftersom man inte kunde analysera om vattnet i brunnen hade ett värde under detta eller ej.

När det gäller metallhalter utvecklades Atomabsorptionsspektrofotometrin (AAS) vilket är ett analysinstrument som kan mäta metallhalter ner till ppb-nivån (parts per billion). Detta ledde till att man kunde sänka tillåtna gränsvärden. Problemet med halter som analyserats med hjälp av AAS är att de inte tar hänsyn till vilken form metallen befinner sig i. Den anger enbart totalhalten av till exempel koppar. Vid analysen har man dessutom behandlat provet med mycket starka syror och ofta hög temperatur och förhöjt tryck. Man vet ju idag att fast koppar inte är farligt utan först när det blir en kopparjon (envärd eller tvåvärd) som den är biotillgänglig och kan tas upp i kroppen eller i växten och detta kan inte AAS mäta.

För forskarvärlden står alltså idag helt klart att man inte kan ange ett ämnes totalhalt i gränsvärdesbedömningar. Man måste ange halten i biotillgänglig form. I dag sker mycket forskning kring olika metoder att ta fram just halten biotillgänglig koppar. Det är dock mycket mer komplicerat och svårt (och således även dyrt) än att bestämma totalhalten så det kan dröja ännu ett tag innan någon metod tagits fram som är tillräckligt robust, säker och billig (även om EU 2003 har godkänt användning av nya metoder när man vill förutsäga metallers biotillgänglighet i miljön vid lokala riskbedömningar). Men man kommer säkert att använda totalkoncentration som gränsvärde ett bra tag till, framför allt i jord som är betydligt mer komplicerat än vattenlösningar.

Ett annat problem är att man måste titta på varje område separat och se vilken bakgrundsnivå som finns av det aktuella ämnet och vilka organismer som finns i området. Detta eftersom olika organismer tar upp olika former av det aktuella ämnet. Bakgrundsnivån är viktig eftersom de individer som finns på ett område sedan länge kan ha lärt sig att klara av den halt som det aktuella ämnet trots att det är en relativt hög nivå. Sker en snabb ändring kan man däremot befara att det kommer att kunna påverka organismer och växtlighet negativt.

Koncentrationen av löst metall i markvätskan varierar med årstidväxlingar (temperatur, fukthalt, ljus, mikroorganismers aktivitet mm). Man måste även ta hänsyn till detta när man utför analyser och drar slutsatser från dessa.

2.1.3 Koppar inom jordbruket

Till en åkermark tillförs koppar från atmosfärisk deposition, med rötslam eller med gödsel. Mängden som kommer från atmosfären består av både våt och torr deposition och är starkt varierande och därför svårbestämd. En undersökning (5) gav att depositionen i inlandet varierade mellan 18 – 500 g /ha och år (torr deposition) och bidraget från våt deposition var 330 g / ha och år. (5)

Rötslam (om det används) tillför idag max 300 g koppar/ha/år (6).

Koppar är ett mikronäringsämne och kopparbrist anses råda i åkerjord om kopparhalten understiger 15 kg /ha vilket motsvarar 7 mgCu/kg torr jord (mulljordar behöver upp till 14 mg Cu/kg torr jord). Ca 25% av Sveriges åkrar anses ha kopparbrist.

Kopparbrist uppstår främst på mull- och sandjordar. Vårsäd, vete och lusern är mest känsliga för kopparbrist. Vid svår kopparbrist uppstår gulspetssjukan. Lindrig kopparbrist ger ingen synlig symptom på plantan men kärnsättningen påverkas negativt (slökornssjukan).(6)

Eftersom koppar är en essentiell metall dvs livsviktig för organismer har man gödlat inom jordbruket med kopparhaltigt slam, så kallade koppargivor. I dag finns det en oro för långtidseffekter av detta beteende. Avloppsslam som används innehåller koppar som främst utfällts från hushållens kopparrör. Flera undersökningar har utförts i världen (5) för att söka svaret på om det är farligt eller ej och vilka långtidseffekter man kan erhålla vid användning av rötslam som jordförbättringsmedel inom jordbruk. Bland annat har man i ett försök (1) under 18 växtsäsonger årligen spridit kopparberikat avloppsslam. Mängden koppar har varit mellan 1,4 och 4,2 kg/ha och år. Man har då kontrollerat grödor och marken med avseende på eventuella skador, men inte funnit några. Man föreslog efter undersökningen att ett högsta värde på koppargivorna skulle ligga på mellan 1,4 och 2,0 kg Cu/ha och år. Sedan år 2000 är gränsvärdet för att få använda avloppsslam 300 g Cu / ha och år (högre mängd får användas om det kan visas att den aktuella åkermarken där avloppsslam ska spridas behöver koppartillförsel) (6).

Inom jordbruket används koppar framför allt i kopparsulfatform som näringstillskott i djurfoder och gödningsmedel men även som svampdödande medel, bekämpningsmedel och algicid.

Vilken form koppar har i jord beror på ett flertal faktorer såsom jordens sammansättning, pH-värdet, typ och distribution av organiska föreningar, jordens redoxpotential, närvaro av oxider, dess jonbytkapacitet och andelen ler-, silt- eller sandpartiklar. (5) Hur länge kopparn finns i jorden beror också på klimatet och vilken typ av vegetation som finns på platsen.

Olika studier (5) visar att koppar från atmosfärisk deposition binds starkt till markens översta skikt, de första få centimetrarna. Det sker således mycket liten transport, om ens någon, av tillförd koppar till grundvattnet. Detta visar att det finns en enorm kapacitet för jorden att binda koppar. Detta gäller främst när det finns organiska beståndsdelar i jorden och i lerjordar. I en studie utförd i Sverige fanns så gott som all koppar i organisk form på ett djup av 15 cm. Även på 50 cm djup indikerade resultatet att koppar i huvudsak var organiskt bundet. Sandjordar (framförallt sura sådana) läcker ner mer koppar till grundvattnet än lerjordar. Ju högre pH-värde desto mer koppar adsorberas till organiska ämnen och till lerpartiklar.

I en annan studie (7)(13) lät avrinningsvatten från korroderat kopparkoppar rinna genom tre olika jordar. Det visade sig att jordarna absorberade mellan 99 och 100 % av den biotillgängliga formen av koppar. Detta gällde även den jord som ansågs ha låg förmåga att binda metalljoner.

Mark är mycket inhomogent och egenskaperna varierar stort mellan olika platser beroende på markens innehåll. Innehållet påverkar de kemiska processer som sker och som leder till hur biotillgänglig koppar är. Man har därför numer börjat analysera jordens innehåll av koppar utgående från vilken form den är i men det är som tidigare nämnts betydligt svårare och dyrare än att bestämma totalhalten. Det är dock inte helt fel att analysera totalhalt för det råder en jämvikt mellan totalhalt och de olika former koppar finns i. Men denna jämvikt är i sig beroende på vilka processer som sker i jorden och följaktligen är den beroende på förhållandet och innehållet i jorden. En mycket viktig parameter till exempel är vad jorden består av. Om det finns organiska ämnen (humusämnen till exempel) kommer dessa att binda frigjord koppar och biotillgängligheten minskar.

I åkerjordar finns det mer ämnen att reagera med än i sandjordar. Koppar som kommer i kontakt med lerjordar och jordar med humus kommer således att absorberas i högre grad än den koppar som kommer i kontakt med sandjordar.

Naturvårdsverket anger riktvärdet 100 mg koppar / kg torrsubstans (TS) för att en jord ska klassas som miljöfarligt avfall. Omräknat till hektar blir det 214 kg / ha.

Medianhalten för koppar i svensk åkermark är 11,4 mg/kg TS (24 kg/ha). (8)

90% av alla matjordar har en halt understigande 28,7 mg/kg TS (61 kg/ha). (8)

Medelhalten är 14,6 mg/kg TS (31 kg/ha). (8)

Det mesta av koppar som når marken ovanifrån absorberas snabbt och stannar kvar i de övre få centimetrarna av jordlagret. Koppar absorberas på organiskt material, karbonatiserad mineral, lermineraller, oxiderat järn och manganoxider. Därefter kan koppar diffundera in lägre in i komplexet och bli än mer stabilt.

Åkerjordar består till största delen av lerpartiklar vilka har en mycket stor förmåga att absorbera kopparjoner.

3 Korrosion i jord av koppar

För att korrosion av koppar i jord ska kunna uppstå krävs vatten och syre. Man säger att syret är korrosionens bränsle. Vattnet finns i jorden, i de övre delarna efter regn eller "bundet" till framför allt humusämnen (torv, mossor som håller regnvattnet längre än till exempel sand). I de lägre delarna finns vattnet som grundvattnet. Syret finns dels i vattnet men kommer

TerraCorrosion AB

även ner i jorden från luften när halten i vattnet sjunker till exempel på grund av korrosion, eftersom det konsumeras syre vid korrosionen. Syrehalten sjunker även vid nedbrytning av organiska ämnen. Detta innebär att luftiga jordar (sand, morän mm) innehåller mer syre än täta jordar såsom lerjordar.

Korrosionen på kopparhaltiga material utsatta för vattenhaltiga korrosionsmedier är vanligen av typ jämn korrosion och sker oftast med mycket låg hastighet. Detta innebär att korrosionen sker jämt över hela den exponerade ytan. Gropfrätning, där korrosionen sker lokalt på ett fåtal ställen, är ovanligt. (9) Det finns dock undantag där gropfrätning kan uppstå under ogynnsamma förhållanden.

Koppar kan finnas i ren form (Cu (s)) och i jonform. När den korroderar bildas joner av koppar. Först bildas envärt positiv jon. Denna kan i sin tur också bilda tvåvärt positiv jon. Det finns en jämvikt mellan dessa former. En jords fasta beståndsdelar är ofta negativt laddade och därför kommer den positivt laddade kopparjonen att snabbt reagera. Förutom denna elektrostatiske attraktion kommer de positiva metalljonerna även att bindas kemiskt till ytorna via funktionella grupper i humus samt på oxider och lerpartiklar. Detta leder till att biotillgängligheten minskar. Med tiden kan kopparjonerna som bundits till mineral och oxidpartiklar diffundera längre in i den fasta fasen (på t.ex. lerpartikeln). Denna process är i princip irreversibel det vill säga den går bara åt ett håll. Detta leder till att kopparn blir mindre rörlig.

1979 startade Korrosionsinstitutet en systematisk långtidsprovning av korrosionshastigheten av koppar i jord redovisat bland annat i (10).

I den redovisade studien har kopparplåtar exponerats för sju olika jordar representativa för svenska jordar. Plåtarna har exponerats både över och under grundvattennivån på varje provningsplats. Grundliga analyser har utförts med avseende på kemisk sammansättning, pH-värde, jordart mm. Provplåtarna var tillverkade av ren fosfordesoxiderad koppar enligt standard SS 50 15-04 med mängd Cu (koppar) (+Ag (silver)) min 99,85 mass-% och P (fosfor) mellan 0,015 – 0,040 mass-%. De övre plåtarna låg på ca 0,7 meters djup och de lägre var placerade på ca 1,7 meters djup.

Tre plåtar från vardera provplats och respektive djup togs upp för analys efter 1, 3 respektive 7 års exponering.

Enligt studien varierade korrosionshastigheten efter sju år mellan $0,1 \mu\text{m}/\text{år}$ och $3,3 \mu\text{m}/\text{år}$. (μm står för miljondels meter).

Studien visade dessutom att korrosionshastigheten inte kunde förklaras enbart utgående från en enstaka parameter utan hög korrosionshastighet krävde att flera parametrar skulle vara ogynnsamma. Det räcker således inte med enbart lågt pH-värde för att korrosionshastigheten ska bli hög utan det krävs även höga halter av andra, korrosiva, ämnen i jorden.

Utmärkande var att testplatserna över grundvattennivån hade övervägande högre korrosionshastigheter än de lägre belagda. Detta beror troligen på, som nämnts tidigare, att syrehalten är högre på de högre belägna platserna. En annan sak som måste uppmärksammas är att korrosionshastigheterna efter ett första år var överlag högre än medelvärdet efter sju år. Korrosionshastigheten kan alltså förväntas vara högst i början för att sedan avta. Detta är i linje med andra korrosionshastighetsundersökningar utförda i jord.

En annan studie genomfördes i direkt anslutning till kraftledningsstolpar 1999 (11). Under 0,54 år (från 5 maj till 19 november) placerades kopparplåtar i jorden vid fyra stolplplatser med varierande jordarter. Korrosionshastigheten varierade mellan 1,6 och 3,5 $\mu\text{m}/\text{år}$. Den

högsta korrosionshastigheten uppmättes i luftig moränjord och den lägsta i lerjord. Dessa korrosionshastigheter kan förväntas sjunka utifrån ovanstående resonemang.

Dessa undersökningar är utförda på släta provplåtar. Ingen av undersökningarna har utförts på tråd och lina. Man kan dock förvänta sig ungefär samma korrosionshastigheter på dessa. Korrosionshastigheten på lina förväntas också vara lika överallt på linans kardeler, oberoende av om de är placerade ytterst eller innerst i linan (12).

3.1 Hur mycket koppar kan förväntas komma ut i jorden från kopparlinan?

En jordningslina av koppar består vanligtvis av 7 trådar, kardeler. Det är aktuellt att använda en sammanlagd koppararea som är antingen 52 mm² eller 70 mm².

Om vi först betraktar exemplet med 52 mm². Då blir tvärsnittsarean på varje kardel 7,4286 mm². Radien på varje kardel blir då 1,5377 mm utifrån ekvation (I)

$$A = \pi * r^2 \dots\dots\dots \text{ekv (I)}$$

där

A= kardelens tvärsnittsarea (mm²)

r = kardelens radie (mm).

Vi utgår från den högsta uppmätta korrosionshastigheten, 3,5 µm/år.

Den ursprungliga ytan kommer då att minska till 7,3948 mm².

Per mm kommer då linan att under ett år avge 7*(0,0338)=0,2366 mm³.

För att kunna få fram mängden koppar i vikt omvandlas talet till enheten dm³:
0,0338 mm³ = 0,0338*10⁻³ cm³ = 0,0338*10⁻⁶ dm³

Därefter multipliceras talet med densiteten för koppar vilken är 8,93 kg/dm³.

Vikten av den koppar som korroderar på en mm under ett år blir då 2,11 * 10⁻⁷ kg = 0,211 mg.

Med denna korrosionshastighet kommer det att ta 439 år innan kopparlinan har korroderat av.

Låt oss betrakta en liksidig hektar åkermark vilken då har en sida lika med 100m.

Vi låter vidare linan passera rakt genom denna hektar. Om den koppar som kommer från linan under dessa 100 meter fördelas jämt på denna hektar blir mängden 211 g / ha.

Sedan betraktar vi en mer realistisk korrosionshastighet, 0,7 µm/år) och en koppararea på 70 mm². Då blir tvärsnittsarean på varje kardel 10 mm². Radien på varje kardel blir då 1,7841 mm utifrån ekvation (I)

Med denna korrosionshastighet kommer det att ta 2500 år innan kopparlinan har korroderat av.

TerraCorrosion AB

Den ursprungliga ytan kommer då att minska efter ett år till 9,9922 mm².

Per mm kommer då linan att under ett år avge $7 \cdot (10 - 9,9922) = 0,0549$ mm³.

För att kunna få fram mängden koppar i vikt omvandlas talet till enheten dm³:

$$0,0549 \text{ mm}^3 = 0,0549 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^3 = 0,0549 \cdot 10^{-6} \text{ dm}^3$$

Därefter multipliceras talet med densiteten för koppar vilken är 8,93 kg/dm³.

Vikten av den koppar som korroderar på en mm under ett år blir då $4,904 \cdot 10^{-7} \text{ kg} = 0,4904$ mg. På 100 meter blir då bidraget från kopparlinan 49 g.

På samma sätt betraktar vi korrosion av 70 mm² -lina med korrosionshastigheten 3,5 µm/år. Bidraget på 100 meter blir då 245 g per år.

Betraktar vi korrosion av 52 mm²-lina med korrosionshastigheten 0,7 µm /år blir bidraget 26 g per år från 100 meter lina.

Betraktar vi en 52 mm²-lina med korrosionshastighet lägre än 0,1 µm/år blir bidraget lägre än 7,5 g per 100 meter.

Dessutom kommer med samma korrosionshastighet bidraget av koppar till jorden bli allt lägre för varje år allteftersom radien på linan minskar.

3.2 Vad händer sedan?

Vi har tidigare talat om att jorden snabbt kommer att absorbera den koppar som kommer ut och den kommer därför inte att nå ut till en hel hektar. Kopparn kommer att stanna i den absoluta närheten, de närmsta centimetrarna, av linan i ett första skede. Här kommer stabila svårlösliga komplex att bildas som innebär att biotillgänglig koppar minskar med upp till 100 % (7). Upptaget av växter från åkermark är mellan 12 g/ha, år (för stråhalm) och 60 g/ha, år (för vall) (6). Eftersom rötterna befinner sig från markytan och ner till ca 20-25 cm djup utgår man från att upptaget sker främst på denna del.

Kopparlinan kommer att ligga placerad under det omrörda jordlagret för att inte störa jordbruket och på det djupet når normalt inte växtrötterna.

De svårlösliga komplexen kommer så småningom att transporteras med regnvatten till grundvattnet och recipienter. Hastigheten beror på flera faktorer, bland annat hur väl dränerad jorden är. I en sandjord går det därför fortare än i en lerjord. Detta beror också på att i en lerjord finns mer ämnen som tar hand om kopparn än i en sandjord. Även pH-värdet spelar roll. En surare jord lakar ur mer än en jord med högt pH-värde. Men det är fortfarande i form av stabila komplex kopparn kommer att föreligga. Utspädningen kommer dessutom att vara enorm.

4 Placering av den nya 400 kV-ledningen

Figur 1 visar en karta med kopparhalter i åkrar i de områden där det planeras att den nya 400 kV-ledningen ska byggas. (8).

De färgade områdena motsvaras av följande halter (i mg koppar per kg torr jord):

Blå	< 5,3 mg	(innebär kopparbrist)
Grön	5,3 – 7,6	(innebär kopparbrist)
Gul	7,6 – 11,4	(innebär kopparbrist i mullrika jordar)
Orange	11,4 – 18,7	(medianvärdet i svenska jordar är 11,4, medelvärde är 14,6)
Röd	18,7 – 28,7	
Mörkröd	> 28,7	

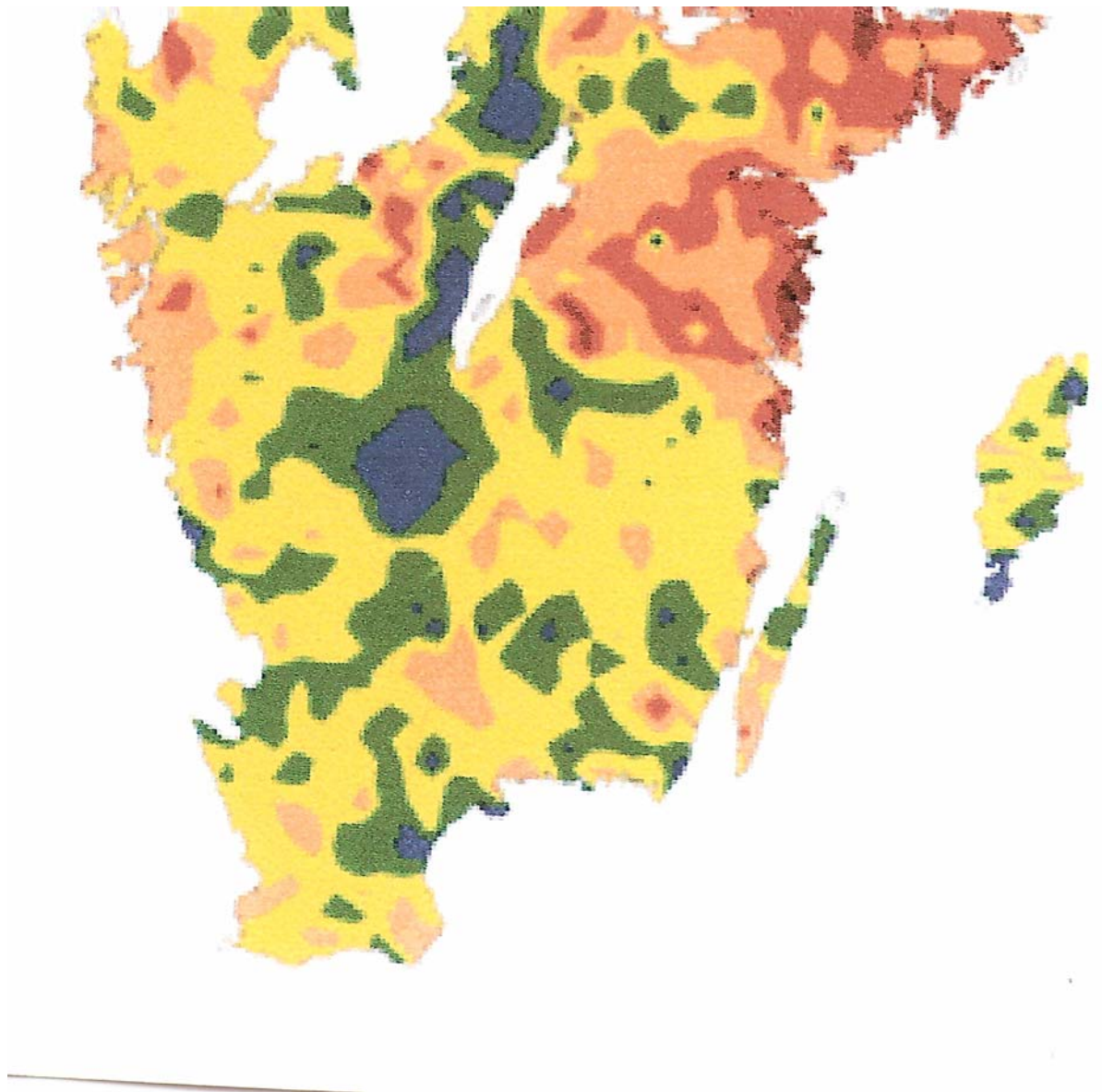


Fig.1. Kopparhalter i matjord. Från rapport (8).

Om man placerar två av de tänkta alternativen på ledningssträckorna på föregående bild kan man se att de passerar kopparfattiga åkrar och åkrar med medelvärden på kopparhalterna. Inget område med höga eller extremt höga värden på kopparhalter kommer att passeras, se fig 2.



Fig 2. Möjliga sträckningar väster respektive öster om Vättern (ej exakt ritade).

Om man jämför de alternativa vägarna för den nya 400-kV-ledningen kan man se att väljs en väg väster om Vättern kommer ledningen att i stor utsträckning passera åkrar med kopparbrist (blåa och gröna områden i fig 1).

5 Resultat

Om man använder 70 mm² kopparlina och korrosionshastigheten är 3,5 µm / år sker ett utläckage av koppar lika med 245g/år på en sträcka av 100 m. Om man använder 52 mm² kopparlina i samma jord sker ett utläckage av koppar lika med 211 g/år.

Om man använder 70 mm² kopparlina och korrosionshastigheten är 0,7 µm /år sker ett utläckage av koppar lika med 49 g/år på en sträcka av 100m.

Om man använder 52 mm² kopparlina i samma jord sker ett utläckage av koppar lika med 26 g/år på en sträcka av 100 m.

Om korrosionshastigheten är lägre än <0,1 µm/år blir utläckaget vid användning av 52 mm²-lina lägre än ca 7 g /år från 100 meter lina.

100 meter utgör en sida av en liksidig hektar mark och används för att kunna jämföra värden som ofta anges per hektar.

För att få en uppfattning om hur stor de mängder är som korroderat ut jämför vi med andra mängder på bakgrundshalter, halter för att en jord ska anses ha kopparbrist mm, se tabell 1

Tab 1. Årligt bidrag till mark från korroderad kopparlina samt jämförande halter.

	Mängd koppar per hektar (gram)	Källa
Bidrag per år från 52 mm ² Cu-lina, korrosionshastighet 3,5 µm/år	211	Denna rapport
Bidrag per år från 70 mm ² Cu-lina, korrosionshastighet 3,5 µm/år	245	Denna rapport
Bidrag per år från 52 mm ² Cu-lina, korrosionshastighet 0,7 µm/år	26	Denna rapport
Bidrag per år från 70 mm ² Cu-lina, korrosionshastighet 0,7 µm/år	49	Denna rapport
Bidraget per år från 52 mm ² Cu-lina, korrosionshastighet <0,1 µm/år	<7,5	Denna rapport
Halt för kopparbrist (ej mullrik jord)	<15 000	(8)
Halt för kopparbrist, mullrik jord	<30 000	(6)
Halt för att jord ska klassas som miljöfarligt avfall	214 000	Naturvårdsverket
Medelhalt i svensk åkermark	31 000	(8)
Medianhalt i svensk åkermark	24 000	(8)
Tillåten halt i åker som ska tillföras avloppsslam	86 000	(6)
Gränsvärde för hur mycket koppar som får tillföras åkrar från avloppsslam	300	(6)
Upptag av växter	12-60	(6)

Halterna för kopparbrist i mullrik mark, jord som ska klassas som miljöfarligt avfall, medelhalter, tillåten halt för åker som ska få tillföras avloppsslam är beräknade utifrån halten för kopparbrist som är uttryckt både i mg Cu / kg TS och i halt kg/ha. Den omräkningsfaktorn har sedan använts till övriga halter.

För att få använda avloppsslam på åkrar tillåts en kopparhalt av 40 mg/kg torr jord. Enligt (5) är det tillåtet att använda rötslam med 600 mg Cu /kg TS. Det värdet ger ingen riktlinje på hur mycket som får spridas. Enligt (6) var gränsvärdet tidigare 600 g per år och hektar som fick spridas via rötslam. Från 2000 är gränsvärdet 300 g/ha, år.)

Tabellen visar att utläckaget från kopparlinan är en mycket liten del av tillåten halt. Men den visar också att med 70 mm²-lina och med högsta korrosionshastigheten närmar man sig tillåten mängd som årligen får spridas via avloppsslam.

6 Diskussion och slutsatser

Beräkningar på utläckage av koppar från jordningslinan har utförts med bland annat de högsta uppmätta korrosionshastigheterna, runt 3,5 μm , av koppar i lerjord och i skogsmark samt en mer realistisk korrosionshastighet utgående från korrosionshastigheter uppmätta nära de platser ledningen ska gå. I verkligheten kan korrosionshastigheten vara ännu lägre. Flera av de provningar som gjorts av korrosionshastigheten av koppar i svenska jordar uppvisade korrosionshastigheter som var lägre än 0,1 $\mu\text{m}/\text{år}$, de var således inte mätbara.

Jämfört med bakgrundshalterna av koppar i jord kommer tillskottet från kopparlinan att vara försvinnande litet. I fallet med högsta korrosionshastigheten och 70 mm^2 -lina utgör dock korrosionen ett nästan lika stort tillskott som man får ge per hektar och år vid användandet av avloppsslam på åkrar. Utsläppet kommer dock att ske väldigt lokalt så den diffusa mängden blir mycket liten. På lokal nivå (några centimetrar runt linan) kan man dock inte utesluta att organismer påverkas negativt. På åkrar kommer linan att vara placerad på ett djup som inte ska störa jordbruket och dit rötterna normalt inte når. Dessutom kommer den koppar som frigörs att till mer än 99% tas upp av organiska och oorganiska ämnen i marken vilket bildar stabila, svårösliga föreningar och komplex. Med den dåliga rörligheten som koppars kommer att få i de former som är aktuella kommer med största sannolikhet den koppar som kommer från kabeln överhuvudtaget inte vara tillgänglig för växterna. De bildade föreningarna och komplexen kommer så småningom att lakas ut till grundvattnet och till recipienter (år, sjöar, hav). Detta kommer att ske snabbare i sandiga jordar än i lerjordar. En del koppar kommer att återvända till sin ursprungliga form av mineral. Även i grundvattnet och i recipienterna kommer de till övervägande del att föreligga i stabila, svårösliga föreningar och då dessutom i mycket utspädd form.

På samma plats och med konstant korrosionshastighet kommer kopparmängden från linan att minska för varje år allteftersom radien på linans kardeler minskar. De mängder som beräknats här är därför de maximala mängder som kan komma i fråga även över tid.

Forskarna är idag överens om att totalhalten koppar inte är intressant för att bestämma om koppar är miljöfarligt eller ej. Det är halten biotillgänglig koppar som är viktig att analysera. Dessutom måste biotillgängligheten för respektive organism betraktas. Halten biotillgänglig koppar kommer i de beräknade fallen vara ytterst låga. Beträffande långtidseffekter av användandet av koppar i jord enligt de undersökningar som utförts med kopparhaltigt slam, och i betydligt högre halter än vad som är tillåtet idag, under många år kunde inga negativa effekter upptäckas varken på grödor eller organismer.

Rapporten har fokuserat på korrosionshastigheter och jämförande värden på jordars kopparinnehåll i stort samt vad som sker kemiskt i jorden. I rapporten finns därför inga redogörelser för vad olika organismer tål då detta kräver granskning av specialister inom ekotoxikologi. Det är inom denna disciplin som det råder delade meningar om vid vilka halter koppar är giftigt och hur det ska bestämmas. Man diskuterar även långtidseffekter och det finns forskare som anser att även en mycket liten höjning av de naturliga nivåerna kan medföra en markant ökning av toxiciteten. Man är dock eniga om att det krävs mer forskning innan det går att med bestämdhet uttala sig i ämnet.

Slutsatsen i denna rapport är att det bidrag av koppar från korroderad jordningslina av koppar som kan bli aktuellt inte har någon påverkan, utänför de närmsta centimetrarna från linan, på människa eller miljö varken direkt eller i framtiden. Närmst linan kan man inte utesluta att det

kan bli så höga halter biotillgänglig koppar att organismer kan ta skada, men detta blir då i mycket begränsad omfattning. Att få svar på den frågan kräver dock ingående fältstudier.

För att eventuellt få svar på den frågan skulle man kunna tänka sig att efter det att linan lagts ner erbjuda ekotoxikologer att använda några platser för sin forskning för att utföra en undersökning i efterhand.

7 Referenser

- (1) Landner, L., Reuther, R., "Metals in Society and in the environment – A Critical Review of Current Knowledge on Fluxes, Speciation, Bioavailability and Risk for Adverse Effects of Copper, Chromium, Nickel and Zinc", Kluwer Academic Publishers, 2004
- (2) Sternbeck, J., "Upptredande och effekter av koppar i vatten och mark", IVL Svenska Miljöinstitutet AB, IVL-rapport B1349, utgiven senare än 1999.
- (3) "Kemiska hälsorisker – Toxikologi i kemiskt perspektiv", Birgersson, B., Sterner, O., Zimerson, E., Hermods/Almqvists & Wiksell Förlag AB, 1991.
- (4) Lindgren, G., Pl 1363, 446 00 Älvängen, Sweden kan läsas på www.safesoil.com.
- (5) Copper (EHC 200, 1998).
- (6) Växtodlingsdata 2002, Länsstyrelsen i Västra Götaland.
- (7) Odnevall Wallinder, I., Leygraf, C., m fl, Avd för Korrosionslära, KTH.
- (8) Eriksson, J., Andersson, A., Andersson, R., "Tillståndet i svensk åkermark", Naturvårdsverket. Rapport 4778, 1997.
- (9) Mattsson, E., "Elektrokemi och korrosionslära", Bulletin nr 100, Korrosionsinstitutet, Stockholm 1992.
- (10) Camitz, G., Vinka, T-G, "Corrosion of copper in Swedish soils", 12th Scandinavian Corrosion Congress & Eurocorr'92".
- (11) Forssander, M., "Korrosion i jord av kraftledningsstolpar och -stag – Katodiskt skydd med påtryckt ström och fjärranodbädd för skydd av kraftledningsstolpar – Slutrapport", Elforskrapport 99:43.
- (12) Mats Linder, Kimab, personlig kontakt.
- (13) Odnevall, I., Wallinder, M, Bertling, S., "Vad händer med koppar i avrinningsvatten när den kommer i kontakt med vår miljö?", Koppar Forum, nr 15:2003.

-o-O-o-