



Katodiskt korrosionsskydd av kraftledningsstolpars jord- fundament och stagförankringar

Utformning

Elforsk rapport 13:20



Bertil Sandberg och Märit Forssander

2012

ELFORSK

Katodiskt korrosionsskydd av kraftledningsstolpars jord- fundament och stagförankringar

Utformning

Elforsk rapport 13:20

Förord

Rapporten 13:20 är ett projektresultat av det samlade ramprogrammet för Underhåll, Diagnostik och Reinvesteringsstrategi som startades under 2010.

Målsättning 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*

Prioriteringar inom programmet har gjort att måluppfyllelsen är mycket god vad beträffar kortsiktiga och handgripliga projekt, men svagare vad beträffar långsiktiga frågor och managementfrågor. Reinvesteringsstrategier liksom reservdelshållning saknas i projektportföljen.

De finansierande företagen i ramprogrammet är följande:

Svenska Kraftnät	Jönköping Energi Nät AB
Vattenfall Eldistribution AB	Gävle Energi AB
E.ON Elnät Sverige AB	Eskilstuna Energi & Miljö AB
Fortum Distribution	Sundsvall Elnät AB
ABB AB	Borås Elnät AB
Göteborg Energi AB	Växjö Energi Elnät AB
Skellefteå Kraft Elnät AB	Borlänge Energi AB
Jämtkraft Elnät AB	Pite Energi AB
Umeå Energi Elnät AB	

Ramprogrammets styrgrupp består av följande personer:

- Hans-Erik Carlsson E.ON Elnät Sverige AB, ordförande
- Rikard Persson Svenska Kraftnät
- David Håkansson Borås Elnät AB
- Mats-Erik Jansson, Jämtkraft Elnät AB
- Torbjörn Jernström Vattenfall Eldistribution AB
- Henrik Karlsson Fortum Distribution
- Ferruccio Vuinovich, Göteborg Energi Nät AB
- Örjan Kvist, Växjö Energi Elnät AB
- Thomas Fogelberg ABB Power Transformers
- Reyna Lind, Sundsvall Elnät AB
- Sven Jansson Elforsk AB, programansvarig

Sammanfattning

Flera utredningar, bland annat i Elforsks regi, har visat att kraftledningsstolpars jordfundament och stag är utsatta för korrosion i varierande omfattning. En av de metoder som används för att minska korrosionen är att installera katodiskt korrosionsskydd med offeranoder. Antalet erforderliga anoder och optimal placering påverkas av markförhållandena (jordresistivitet, jordlagerföljd, grundvattenytans läge). Vidare måste hänsyn tas till fundamentets och stagförankringens utformning och om topplinan är isolerad eller inte. Att detaljprojektera skyddet för varje stolpplats blir allt för kostnadskrävande. Syftet med denna undersökning är att ta fram instruktioner för de vanligaste typfallen vid installation av katodiskt korrosionsskydd med näranoder.

Efter inledande teoretiska beräkningar utfördes fältförsök där magnesiumanoder installerades på olika typer av stolpar. Skyddsverkan utvärderades med hjälp av förvägda provplåtar, mätning av potentialvärden samt mätning av anodströmmar.

Resultaten kan sammanfattas enligt följande:

- Det nödvändiga antalet anoder enligt de teoretiska beräkningarna stämmer överens med verkligheten.
- I fält uppmätta strömutmatningarna var lägre än de teoretiska beräkningarna vilket är gynnsamt då skydd kan erhållas med färre antalet anoder.
- Den bästa skyddseffekten erhålls om anoderna placeras så långt ner som möjligt.
- Vid installation av katodiskt korrosionsskydd (KKS) minskar korrosionshastigheten mindre vid högre resistivitet på jorden än vid lägre resistivitet på jorden.
- Om jordresistiviteten är lägre än 100 Ω m fungerar katodisk skydd bra. Även vid högre resistivetsvärden kan det fungera men då måste grundvattennivån stå utmed fundamentet/staget och jordarten får inte bestå av sand, grus eller annat grövre material.
- Rekommendationen för A-stolpe är att placera en anod liggande parallellt med balken på varje sida, ca 50 cm utanför balken. Detta innebär att varje ramben ska ha totalt 2 anoder.
- Rekommendationen för B-stolpar är att anoderna placeras liggande från varje ramstång och snett ut från ramstången i jämnhöjd med balken.
- Rekommendationen för stagförankringar är att placera en anod per stagförankring, horisontellt från staget och utåt i jämnhöjd med grundbulten.
- Om topplinan är isolerad kan två centralt placerad anod skydda hela stolpplatsen, vilket verifierats i tidigare undersökningar på CL11 S6-7.

Summary

It is well known that foundations to steel poles and steel stays are subjected to corrosion in the soil. One of the methods to suppress the corrosion is by installing galvanic cathodic protection with local anodes. The number of anodes and where to place them to attain optimal protection is influenced by the soil, the construction and if the top conductor is isolated or not.

The aim with this investigation is to test a number of different applications of galvanic cathodic protection and to give an instruction how to install the cathodic protection for the most common constructions of fundaments to the poles.

After theorethical calculations different anode constellations were tested in field. The protection was measured by test panels, measurement of the electrochemical potential and anode current.

The result:

- The theoretically calculated best number of anodes is according to the reality.
- The anodes shall be placed deep in the soil (at the grillage) to achieve best protection.
- The cathodic protection can be achieved in soil resistivity up to 100 Ωm or higher in special cases.
- For A-poles recommendation is to place two anodes at each tower leg, horizontally and parallel with the tower legs.
- For B-poles recommendation is to place four anodes at each tower leg, horizontally and out from the tower legs in each corner.
- For stays recommendation is to place one anode at each stay, horizontally and out from the stay.
- If the top wire is isolated it has been showed on one line that the whole tower can be protected with two anodes centrally placed.

Innehåll

1	Bakgrund	1
2	Syfte	2
3	Mål	3
4	Projektutformning	4
5	Teoretiska beräkningar	5
5.1	Korrosion på kraftledningsfundament	5
5.2	Skyddsutformning	5
5.3	Strömbehov	7
5.4	Strömutmatning.....	9
5.5	Möjlighet till skydd i olika jordarter.....	11
5.6	Anodlivslängd	16
6	Fältförsök	21
6.1	Inventering	21
6.2	Installation av anoder och provplåtar.....	24
6.2.1	A-stolpe	24
6.2.2	B-stolpe	24
6.2.3	Trästolpe	24
6.3	Resultat	24
7	Installationsanvisning	32
7.1	A-stolpe.....	32
7.2	B-stolpe	33
7.3	Trästolpe med stag	34
7.4	Stolpe med isolerad topplina	36

1 Bakgrund

Flera utredningar, bland annat i Elforsks regi, har visat att kraftledningsstolpars jordfundament och stag är utsatta för korrosion i varierande omfattning. Redan på 50-talet utförde Vattenfall de första försöken att skydda kraftledningsstolpars jordfundament med katodiskt korrosionsskydd. Ett stort utvecklingsarbete inom området katodiskt korrosionsskydd av kraftledningsstolpar, bekostat främst av Elforsk, har pågått mellan 1995 och fram till idag. 2007 kom handboken "Potential för skydd av den gömda metallen – Våga installera katodiskt korrosionsskydd" utgiven av Elforsk, Sverige kommuner och landsting samt KIMab. I denna beskrivs katodiskt skydd, dess potential, funktion och vad man ska tänka på som inköpare. Sedan ett par år tillbaka har metoden använts rutinmässigt av Svenska Kraftnät.

Trots allt som utförts finns kompetensen om hur skyddet ska konstrueras i detalj endast hos ett fåtal personer. Detta innebär att vid varje installation måste någon av dessa kontaktas. För att bestämma exakt hur installationen ska utföras måste egentligen denna person åka ut i fält och utföra mätningar, vilket blir mycket dyrt. Det finns också vissa begränsningar i metoden och i dag säkrar man upp för dessa genom att installera ett större antal anoder än vad som troligen krävs.

Antalet erforderliga anoder och optimal placering påverkas av markförhållandena (jordresistivitet, jordlagerföljd, grundvattenytans läge). Vidare måste hänsyn tas till fundamentets och stagförankringens utformning och om topplinan är isolerad eller inte. Att detaljprojektera skyddet för varje stolpplats blir allt för kostnadskrävande. Istället bör ett antal typfall tas fram som utgör underlag för upphandling/installation.

Varje år installeras ca 300 anoder, en siffra som kommer att öka framöver allteftersom kraftledningsstolparnas ålder och oundvikliga korrosionsangrepp ökar. Varje anod kostar i inköp ca 1000 kr. Till detta läggs installationskostnader som kan uppskattas till minst lika mycket. Genom att optimera skyddet bör man kunna minska kostnaden utan att skyddet försämras. Kan man minska kostnaden med 20% sparas 120 kkr per år. I dag kanske vi placerar anoder på stolpar som inte kan skyddas med katodiskt korrosionsskydd då jordresistiviteten egentligen är för hög. Genom att öka kunskapen kan vi således också öka skyddets tillförlitlighet.

2 Syfte

Syftet är att utföra teoretiska beräkningar följt av fältförsök för att bestämma optimal utformning av kraftledningsstolpars korrosionsskydd med hjälp av katodiskt korrosionsskydd med näranoder. Ett antal typfall ska tas fram. Dessutom ska en beskrivning av hur skyddet installeras skrivas som kan användas direkt i fält. Slutligen ska ett seminarie hållas.

3 Mål

Målet är att öka kunskapen om hur det katodiska skyddet ska utformas för kraftledningsstolpar samt att överföra kunskap om hur ett katodiskt korrosionsskydd ska utformas för skydd av kraftledningsstolpars jordförlagda delar.

4 Projektutformning

I projektet ingår följande moment:

- Teoretiska beräkningar utförs för att bestämma lämpligt antal anoder för olika typer av stolpar och olika markförhållanden.
- Vid fältförsök provas olika anodplaceringar.
- Skyddsförmågan mäts främst genom att installera förvägda provplåtar med och utan kontakt med skyddet och stolpen.
- Efter ett år tas provplåtarna upp och vägs igen vilket ger det verkliga svaret på skyddets effektivitet.
- En inventering genomförs där man kartlägger de till antalet mest förekommande stolptyperna och markförhållandena.
- Ett antal typfall på anodinstallationer tas fram som täcker in de flesta kombinationer av fundamentsutformning och markförhållanden.
- Instruktion skrivs som beskriver installationsförfarandet.
- Rapport skrivs.
- Seminarie hålls vid lämpligt tillfälle och plats.

5 Teoretiska beräkningar

5.1 Korrosion på kraftledningsfundament

Korrosionshastigheten för zink varierar med jordart enligt nedan.

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

Korrosionshastigheten i fyllnadsjord kan variera kraftigt beroende dess sammansättning.

För stål varierar korrosionshastigheten:

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

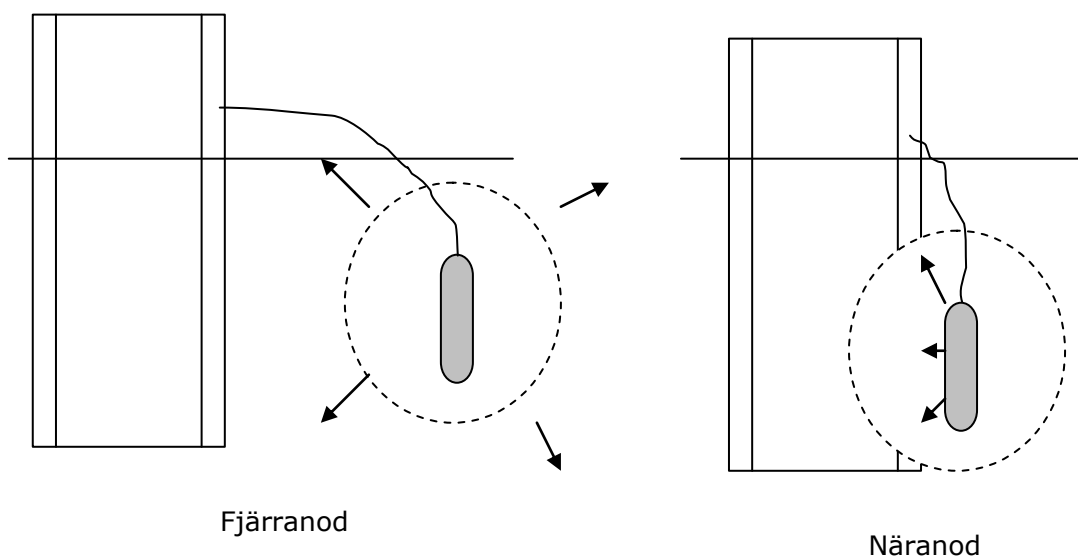
I **samma jordart** uppstår den högsta korrosionshastigheten vid ca. 7 % vattenhalt. Detta är en låg vattenhalt vilket innebär att den kraftigaste korrosionen sker ett stycke ovanför grundvattenytan. Högst lokal korrosion (midjebildning på ramstänger) sker om grundvattenytan ligger nära eller sammanfaller med markytan. Lägst lokal korrosion uppstår om grundvattenytan permanent ligger under fundamentsbalken. Ett mellanting uppstår om grundvattenytan varierar utmed fundamentet.

5.2 Skyddsutformning

Om en offeranod placeras tillräckligt långt bort, ett antal m, från det objekt som ska skyddas uppnås optimal strömspridning dvs skyddseffekten blir jämn över ytan. Då offeranoder började användas för att skydda fundament placerades av denna anledning anoderna flera meter från fundamentet. Det visade sig dock att skyddseffekten blev närmast obefintlig, trots att dimensionering utförts efter konstens alla regler. Långt senare insåg man att det faktum att varje enskild stolplats var förbunden med övriga stolplatser via topplinan gjorde att installerade anoder även lämnade skyddsström till kringliggande stolplatser. Detta innebar att den stolpe där anoderna anslutits endast fick en bråkdel av erforderlig ström. Med isolerad topplina bortfaller detta problem.

Runt anoden skapar den avgivna strömmen ett spänningsfält. Om anoden placeras så att den skyddade konstruktionen kommer inuti detta fält kommer

strömmen att koncentreras till det aktuella fundamentet och endast i mindre grad avges till andra stolpplatser. Detta kallar vi näranod och den tidigare fjärranod, se figur 1.



Figur 1. Fjärr- och näranod.

Ett flertal parametrar inverkar på optimal placering och antal erforderliga anoder. De viktigaste är följande:

Jordens resistivitet.

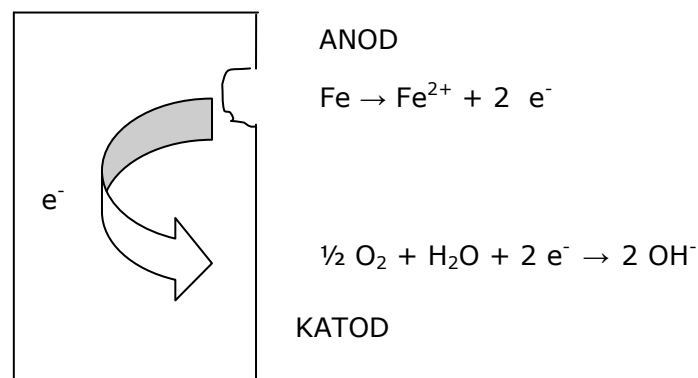
Jordens vattenmättnadsgrad och grundvattenytans läge.

Jordlagerföljden.

Dessa parametrar påverkar både den ström som fodras för att uppnå skydd, den ström som en anod kan avge och strömfördelningen över fundamentets yta.

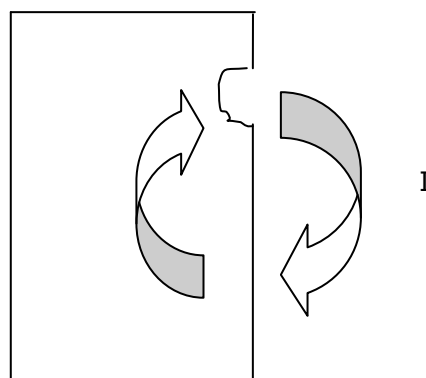
5.3 Strömbehov

Korrosion i vatten och jord är alltid av elektrokemisk natur. Detta betyder att en svag elektrisk ström uppstår samtidigt som kemiska reaktioner inträffar. För att en metall ska korrodera krävs två kemiska reaktioner, en oxidation (metallupplösningen) och en reduktion (vanligen syrgasförbrukning). Oxidationen kallas för anodreaktion och reduktionen för katodreaktion. Vid oxidationsreaktionen frigörs elektroner som transporteras i metallen till en annan punkt där de förbrukas i katodreaktionen.



Figur 2. Korrosionscell.

I metallen transporteras elektronerna således från anoden till katoden. Detta innebär en svag likström i motsatt riktning. En strömkrets måste vara sluten. Detta åstadkoms genom att joner transporteras i vattnet.

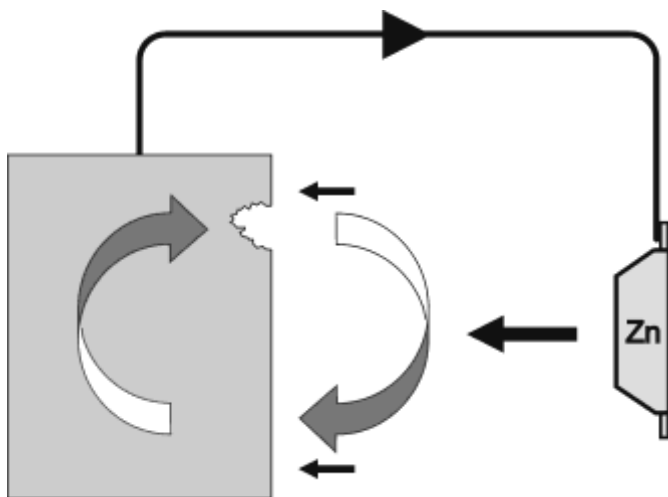


Figur 3. Korrosionsström.

Anod- och katodreaktionerna måste alltid balansera varandra, vilket betyder att de elektroner som frigörs vid anoden måste förbrukas vid katoden. Om anod- och katodreaktioner sker jämnt utspritt över hela ytan uppstår *allmän* korrosion. Angreppets djup blir då i princip lika stort över hela ytan.

Om anod- och katodreaktionerna sker på olika punkter uppstår lokal korrosion dvs djupare angrepp i vissa punkter.

Katodiskt skydd åstadkoms genom att en svag likström matas ut från en anod och in i det skyddade objektet. Den inläckande strömmen motverkar den utläckande korrosionsströmmen. Ju högre skyddsström desto lägre korrosionsström.



Figur 4. Principen för katodiskt skydd.

Vid fullständigt skydd sker bara katodreaktioner på den skyddade ytan. Anodreaktionen (metallupplösningen) sker helt på anodens yta. Katodreaktionen innebär att syret förbrukas i jorden närmast stålytan. I början krävs en förhållandevis hög ström för att förbruka det syre som finns i jorden närmast stålytan. Då skyddsverkan byggts upp minskar strömbehovet. Strömmen ska nu bara förbruka nytt syre som transporteras genom diffusion fram till stålytan.

Med detta som bakgrund är det lätt att förstå att strömbehovet varierar kraftigt från jordart till jordart och att vattenmättnadsgraden har stor betydelse. Följande riktvärden kan ges på den ström som krävs för att uppnå fullständigt skydd:

Lera ovanför grundvattennivån	30-50 mA/m ²
Lera under grundvattennivån	10-20 mA/m ²
Sand ovanför grundvattennivån	100-200 mA/m ²
Sand under grundvattennivån	50-100 mA/m ²

Den totala strömmen som erfordras för ett fundament är produkten av strömbehovet och den mot jord exponerade stålytan. Strömbehovet är lägre för zink varför ett fundament med kvarvarande förzinkning på stora ytor är lättare att skydda. Finns någon form av organisk ytbeläggning blir också erforderlig total ström lägre eftersom vi endast behöver åstadkomma skydd på stålytor i kontakt med jord.

Viktigt att observera är dock att även ett ofullständigt katodiskt skydd sänker korrosionshastigheten. En tumregel är att en sänkning av stålets potential med 100 mV sänker korrosionshastigheten med en faktor 10.

5.4 Strömutmatning

Den ström som en anod kan avge beror dels på anodens geometri dels på jordens resistivitet.

Anodens övergångsmotstånd kan beräknas med nedanstående formel.

$$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L} \ln \frac{2 \cdot L}{d}$$

Där ρ är jordens resistivitet, L anodens längd och d dess diameter.

För fullständigt skydd av stål krävs en negativare potential än -850 mV relativt Cu/CuSO₄.

Anodens egenpotential är -1550 mV varför den drivande spänningen kan sättas till 0,7 V.

Enligt ohms lag erhålls:

$$I = \frac{U}{R}$$

Idag används en 10-kilos magnesiumanod med diametern 114 mm och längden 536 mm. Anoden ligger i en tygsäck med bentonit. Bentonitens funktion är att reducera anodens övergångsmotstånd, motverka passivering, ge jämn förbrukning och förhindra uttorkning pga osmos. Yttermått på tygsäcken är diameter 170 mm och längd 700 mm.

Bentoniten är lågresistiv och sänker därför övergångsmotståndet. Av bilaga A framgår att det är mer korrekt att använda tygsäckens yttermått än anodens mått vid beräkning av övergångsmotståndet och därmed strömvärdet.

För vår anod erhålls följande relation mellan jordens resistivitet och övergångsmotståndet:

$$R = 0,48 \cdot \rho$$

Vilket ger en strömutmatning på $I = \frac{U}{R} = \frac{700}{0,48 \cdot \rho} = \frac{1460}{\rho} \text{ mA}$

Resistiviteten för olika jordarter varierar inom vida gränser beroende på innehåll av lösliga joner och vattenmättnadsgrad, se nedan:

Tabell 1. Typiska jordresistiviteter i de vanligaste jordarterna.

Jord	Resistivitet, Ωm
Lera	2 – 50
Gyttja, dy	5 – 30
Humus	10 – 40
Silt	10 – 100
Torv	20 – 120
Sand, morän	100 – 5000
Skifferjord	300 – 700
Grus	400 – 5000

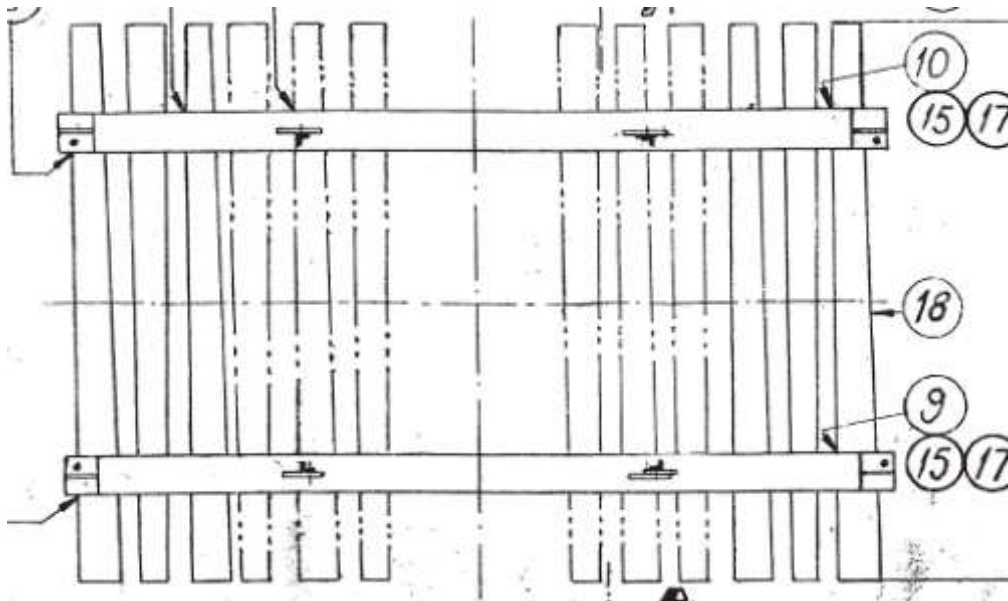
Anoderna bör inte placeras i torr jord. Vi har gjort följande grova uppskattning av medelvärdet för olika jordar i vattenmättat tillstånd. I samma tabell har vi räknat ut motsvarande strömvärdet från en 10-kilos magnesiumanod.

Tabell 2. Medelvärde för jordresistiviteten i olika jordarter vid vattenmättnad och strömvärdet från en 10 kilos magnesiumanod i motsvarande jord.

Jord	Resistivitet, Ωm	Ström, mA
Lera	15	100
Gyttja, dy	15	100
Humus	20	75
Silt	30	50
Torv	30	50
Sand, morän	200	8
Skifferjord	400	4
Grus	600	2

5.5 Möjlighet till skydd i olika jordarter

I denna studie kommer vi att fokusera oss på mittstagade A-stolpar respektive B-stolpar. För båda typerna har träsyllar placerats på schaktbotten. På dessa fixeras 2 balkar varpå stolpen monteras, se figur 5. Stolpen består av L-järn som bildar ett fackverk av ramstänger (vertikala järn) och diagonaler, se figur 6.



Figur 5. Träsyllar och balkar.



Figur 6. Stolpben bestående av ramstänger, diagonaler och balkar.

För B-stolpar är den mot jord exponerade ytan ca 24 m² varav de båda balkarna har en yta på 15 m². För en normal stolpplats med två ben är den totala ytan ca 50 m².

För mittstagade A-stolpar är fundamentets yta inklusive balkar ca 7 m². Till detta kommer stagförankringens yta på 2,4 m². Total yta att skydda på en stolpplats blir således ca 20 m².

I sandjord varierar för skyddet erforderlig strömtäthet mellan 50 och 200 mA/m², se kapitel 3.3. Detta motsvarar ett strömbehov för en A-stolpes ena ben (10 m²) på 500 till 2000 mA. Som framgår av tabell 2 avger en anod i vattenmättad sand endast 8 mA. Antalet anoder skulle bli orimligt stort. Dessutom uppstår interferens mellan anoderna om de placeras nära varandra, som ytterligare minskar dess strömgivning. Vi kan således konstatera att katodiskt skydd med offeranoder inte är möjligt i sand eller andra högresistiva jordarter som morän och grus.

I lera och andra finkorniga/vattenabsorberande jordarter (gyttja, dy, silt och torv) ligger erforderligt strömbehov lägre än i sand/morän/grus, 10-50 mA/m² beroende på vattenhalt. Samtidigt är resistiviteten lägre vilket innebär högre strömgivning från anoderna. Avgörande för hur många anoder som krävs och hur de lämpligast placeras bestäms av grundvattenytans läge och om stolpen står i lera/gyttja/dy eller i silt/torv.

Följande tabeller rörande strömbehov och antal erforderliga anoder kan ställas upp om vi utgår från ett strömbehov på 15 mA/m² i vattenmättad jord och 40 mA/m² i jord ovanför grundvattenytan. Anodernas strömgivning baseras på att de installeras i vattenmättad jord.

Tabell 3. Strömbehov för ett stolpben på en A-stolpe vid olika nivå på grundvattenytan i lera/gyttja/dy/silt/torv.

Läge GW-yta	Yta under GW, m ²	Strömbehov under GW, mA	Yta över GW, m ²	Strömbehov över GW, mA	Totalt strömbehov, mA
Under balk			10	400	400
Utmed stödben*	5	75	5	200	275
Markytan	10	150			150

*halva avståndet balk-markyta.

Tabell 4. Antal erforderliga anoder per stolpben på en A-stolpe vid olika nivå på grundvattenytan i lera/gyttja/dy.

Läge GW-yta	Strömbehov, mA	Strömavgivning/anod, mA	Antal anoder
Under balk	400	100	4
Utmed stödben*	275	100	3
Markytan	150	100	2

*halva avståndet balk-markyta.

Tabell 5. Antal erforderliga anoder per stolpben på en A-stolpe vid olika nivå på grundvattenytan i silt/torv.

Läge GW-yta	Strömbehov, mA	Strömavgivning/anod, mA	Antal anoder
Under balk	400	50	8
Utmed stödben*	275	50	5
Markytan	150	50	3

*halva avståndet balk-markyta.

Tabell 6. Strömbehov för ett stolpben på en B-stolpe vid olika nivå på grundvattenytan i lera/gyttja/dy.

Läge GW-yta	Yta under GW, m2	Strömbehov under GW, mA	Yta över GW, m2	Strömbehov över GW, mA	Totalt strömbehov, mA
Under balk			25	1000	1000
Utmed stödben*	20	300	5	200	500
Markytan	25	375			375

*halva avståndet balk-markyta.

Tabell 7. Antal erforderliga anoder per stolpben på en B-stolpe vid olika nivå på grundvattenytan i lera/gyttja/dy.

Läge GW-yta	Strömbehov, mA	Strömvavgivning/anod, mA	Antal anoder
Under balk	1000	100	10
Utmed stödben*	500	100	5
Markytan	375	100	4

*halva avståndet balk-markyta.

Tabell 8. Antal erforderliga anoder per stolpben på en B-stolpe vid olika nivå på grundvattenytan i silt/torv.

Läge GW-yta	Strömbehov, mA	Strömvavgivning/anod, mA	Antal anoder
Under balk	1000	50	20
Utmed stödben*	500	50	10
Markytan	375	50	8

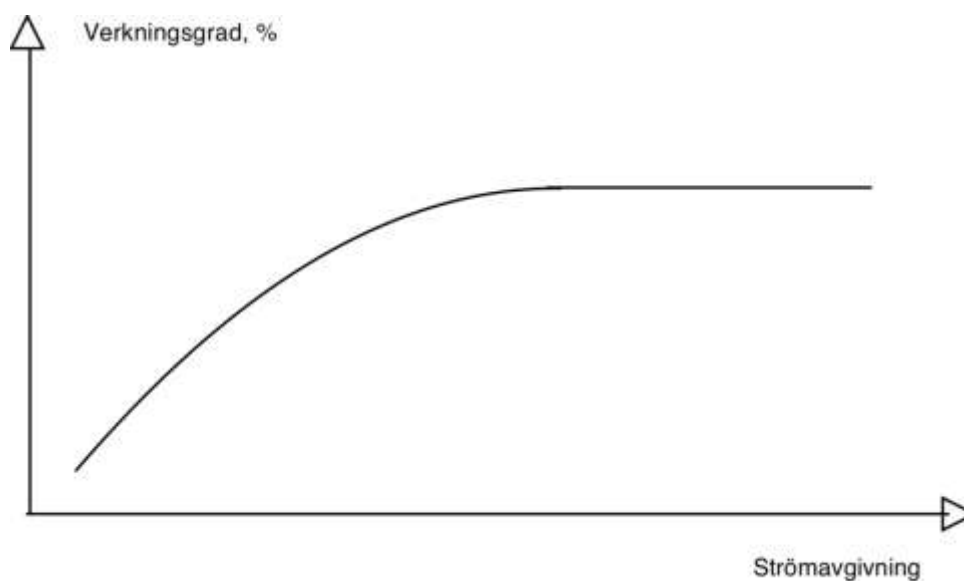
*halva avståndet balk-markyta.

Dessa beräkningar indikerar att det krävs ett stort antal anoder per ben för att åstadkomma ett fullständigt katodiskt skydd, speciellt i silt/torv men även i lera/gyttja/dy för B-stolpar. Idag installeras 4 anoder per ben på B-stolpar.

Det finns två vägar att gå om man vill minska antalet erforderliga anoder. Antingen accepterar man ett ofullständigt skydd (lägre strömtäthet) eller så koncentrerar man skyddet till de delar som är viktigast att skydda. På B-stolpar är balkarna stora och torde medge viss rostmån. Om angrepp på stödben och diagonaler är livslängdsbestämmande kan anoderna placeras på ett sådant sätt att strömvavgivningen till balkarna minimeras och därmed kan antalet anoder reduceras.

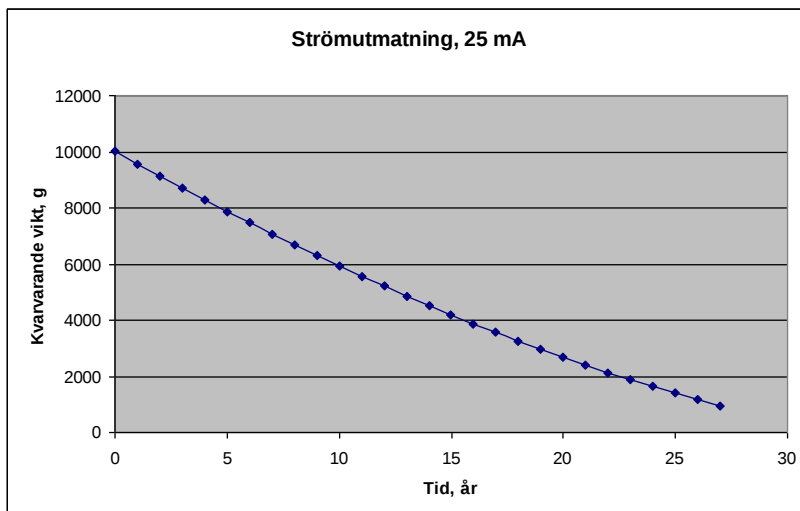
5.6 Anodlivslängd

I de flesta handböcker anges anodförbrukningen för magnesium till 8 kg/Aår. Det teoretiska värdet är 4 kg/Aår men hög egenförbrukning gör att verkningsgraden sällan överstiger 50%. Att alltid räkna med denna verkningsgrad medför dock felaktigt beräknade livslängder i de fall strömvärdet är lågt, se figur nedan.

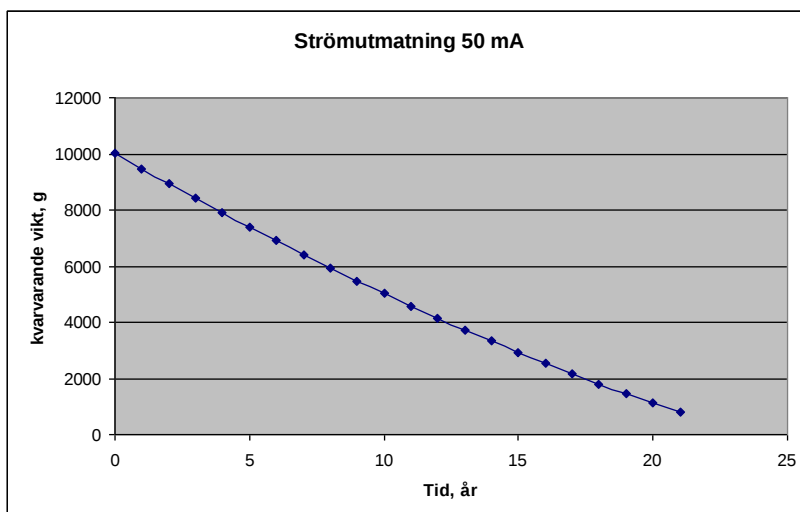


Figur 7. Verkningsgraden hos magnesiumanoder i förhållande till anodens strömvärdet.

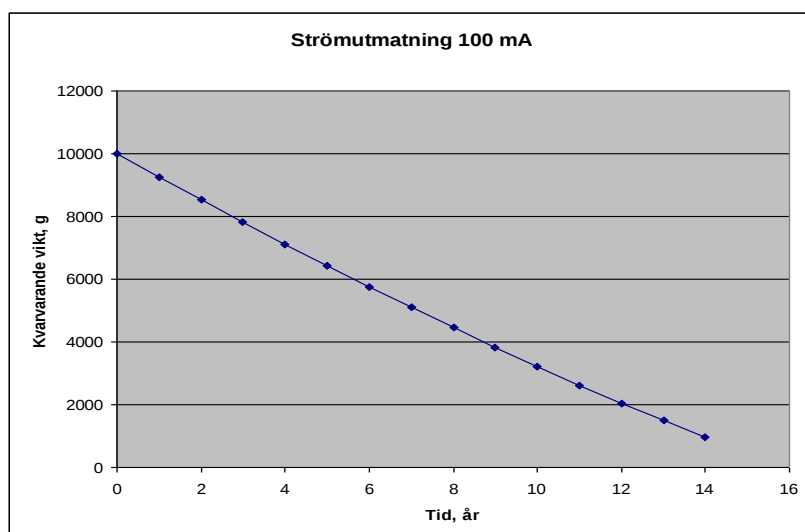
Enligt vår uppfattning bör livslängdsberäkningar baseras på en teoretisk förbrukning på 4 kg/Aår och hänsyn tas till en egenkorrosion som i de flesta fall ligger på ca 1 mm/år. Den utnyttjade 10-kilosanoden har en diameter på 114 mm och längden 536 mm. I de följande diagrammen återges kvarvarande vikt som funktion av tiden vid olika strömvärden.



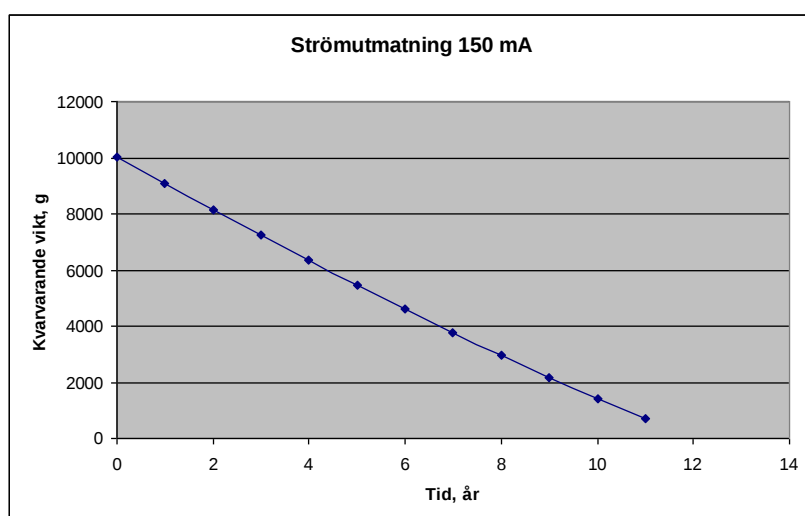
Figur 8. Kvarvarande vikt som funktion av tiden vid en strömgivning på 25 mA.



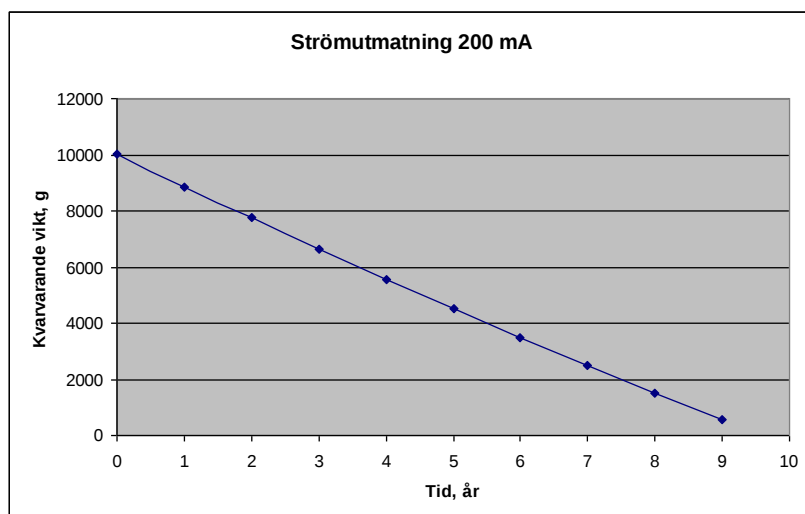
Figur 9. Kvarvarande vikt som funktion av tiden vid en strömgivning på 50 mA.



Figur 10. Kvarvarande vikt som funktion av tiden vid en strömgivning på 100 mA.

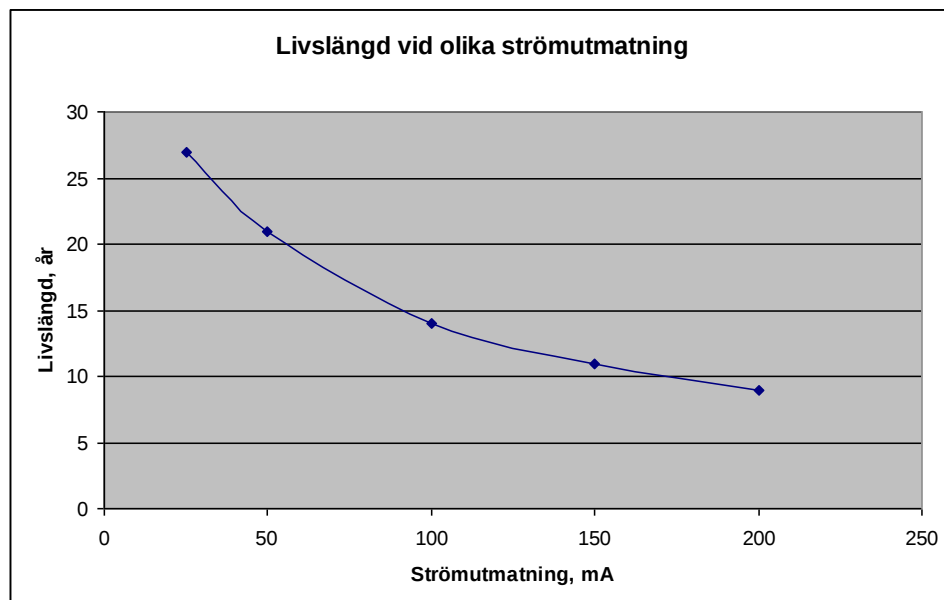


Figur 11. Kvarvarande vikt som funktion av tiden vid en strömgivning på 150 mA.



Figur 12. Kvarvarande vikt som funktion av tiden vid en strömutmatning på 200 mA.

Då det mesta av anoden har förbrukats sjunker strömutmatningen varför vi ansätter att anodens livslängd är slut då återstående massa är 1 kg. Detta ger följande livslängder vid olika strömutmatningar.



Figur 13. Anodens livslängd vid olika strömutmatningar.

Pga den låga verkningsgraden vid låg strömutmatning (större andel onyttig egenkorrosion) är det inte optimalt att överdimensionera antalet anoder. En fördubbling av antalet anoder innebär grovt räknat att strömutmatningen halveras per anod. Om detta görs t.ex. i fallet med 50 mA strömavgivning ökar livslängden endast med 28 % inte 100 %.

Vid en strömavgivning på 100 mA blir livslängden ca 14 år.

6 Fältförsök

6.1 Inventering

Inventering gav att de vanligaste stolpplatserna består av följande konstruktioner:

- A-stolpe i varmförzinkat stål, se figur 14. Denna består av bultade vinkeljärn och bultad regel. Den är alltid stagad och stagen går från vardera stolpbenet ner i gemensamma fundament. Fram till 1986 hade man byggt ca 5100 km med denna stolptyp. Ur korrosionssynpunkt kan även en variant med raka ben men som står i stagen och har, liksom A-stolpen, relativt små jordfundament höra till denna kategori. Då kan man lägga till ytterligare ca 2000 km byggd med denna typ.
- B-stolpe i varmförzinkat stål, se figur 15. Denna består av raka ben med regel. Konstruktionen var från början med svetsade järn, men har senare varit bultade. Mellan år 1951 och 1959 byggdes ca 3000 km med denna typ.
- Stagad trästolpe, se figur 16. Dessa består av trästolpar stagade med stålstag färankrade i jord med stagförankringar av varmförzinkat stål. Stagförankringarna kan se ut på olika sätt, men det har mindre betydelse ur korrosionssynpunkt. På stamnätet finns ca 16 000 trästolpar. Därtill kommer ett stort antal på de lägre spänningarna.



Figur 14. A-stolpe.



Figur 15. B-stolpe.



Figur 16. Trästolpe med stålstag.

Den första kategorin, där A-stolpen ingår, kännetecknas av en relativt liten stålyta mot jord. Ståltagad trästolpe har ju också en relativt liten stålyta mot jord, medan B-stolpar har vanligtvis en betydligt större stålyta mot jord.

Stolparna och stagförankringarna är nergrävda i jorden med olika djup och på så sätt varierar ytan mot jord med djupet på stolpen, se även kapitel 5.

6.2 Installation av anoder och provplåtar

På tre stolpplatser installerades 2011 anoder i olika konstellationer och provplåtar. Efter ett år togs provplåtarna upp och analyserades med avseende på korrosionshastighet. Provplåtar både i kontakt med stolpen/skyddet och utan kontakt analyserades.

6.2.1 A-stolpe

På ben 1 (vänster ben) installerades två anoder. På ena sidan installerades anoden på 1 meters djup och på andra sidan på 50 cm djup. Stolpplatsen ligger på en liten höjd bredvid en åker. Jordresistiviteten uppmättes till 110 Ω m i åkerjorden på 1,6 meters djup.

6.2.2 B-stolpe

På ben 1 (vänster ben) installerades fyra anoder. På sida 1a – 1b lades anoderna ner horisontellt snett ut från varje hörn och på ca 240 cm djup. På andra sidan (1c – 1d) ställdes anoderna upp med undre delen på ca 240 cm djup och ca 0,5 meter utanför varje ramstång.

På ben 2 (höger ben) installerades också fyra anoder. På sida 2a – 2b placerades anoderna lodrätt ca 0,5 meter utanför ramstängerna och centrerat över det konstaterade angreppet på ca 120 cm djup. På sida 2c – 2d installerades anoderna horisontellt och snett ut från vardera ramstång på ca 140 cm djup i nedre kanten av korrosionsangreppen.

Stolpplatsen står lågt i en åker. Jordresistiviteten uppmättes till 44 Ω m på 1,6 meters djup.

6.2.3 Trästolpe

Anoder installerades vid stag på två olika trästolpar.

På ett ställe placeras en anod vertikalt 15 cm från staget och med undre delen på 160 cm djup.

På ett ställe placeras anoden horisontellt på 160 cm djup, 20 cm utanför stagets nedre del och centrerat mot staget.

På ett ställe placeras anoden vertikalt rakt ut från staget och på 1 meters djup.

Stolparna står lågt i lerjord. Jordresistiviteten uppmättes till 28 Ω m på 1,6 meters djup.

6.3 Resultat

Provplåtar installerades enligt tabell 10 -12 där också resultatet från mätning av korrosionshastighet är inskrivet.

Tabell 10. Sammanställning av installerade provplåtar samt korrosionshastighet på A-stolpe.

Nr	Placering	Anodplacering och konfiguration	Korrosionshastighet Medel ($\mu\text{m}/\text{år}$)
898	CL6 S4-5 stp 465, 88 cm djup, ej kontakt		33,4
897	CL6 S4-5 stp 465, 97 cm djup, i kontakt	Parallellt med balk, på ca 1 m djup	6,2
895	CL6 S4-5 stp 465, 31 cm djup, ej kontakt		70,5
894	CL6 S4-5 stp 465, 35 cm djup, i kontakt	Parallellt med balk, på ca 0,5 m djup	11,9

Tabell 11. Sammanställning av installerade provplåtar samt korrosionshastighet på B-stolpe.

Nr	Placering	Anodplacering och konfiguration	Korrosionshastighet Medel ($\mu\text{m}/\text{år}$)
891	CL6 S4-5 stp 458, V-ben, 135 cm djup, i kontakt OBS Ej kontakt vid upptagning OBS		32,5
884	CL6 S4-5 stp 458, V-ben, 140 cm djup, ej kontakt		21,3
888	CL6 S4-5 stp 458, V-ben, 230 cm djup, i kontakt	Horisontellt, snett ut från ramstänger på ca 240 cm djup	0,3
889	CL6 S4-5 stp 458, V-ben, 140 cm djup, i kontakt	Horisontellt, snett ut från ramstänger på ca 240 cm djup	5,0
890	CL6 S4-5 stp 458, V-ben, 230 cm djup, i kontakt	Vertikalt, 0,5 meter utanför ramstänger samt undre delen vid ca 230 cm djup	-2,3 (!)
885	CL6 S4-5 stp 458, H-ben, 230 cm djup, i kontakt	Horisontellt, snett ut från ramstänger på ca 140 cm djup	15,7
886	CL6 S4-5 stp 458, H-ben, 140 cm djup, i kontakt	Horisontellt, snett ut från ramstänger på ca 140 cm djup	8,9
887	CL6 S4-5 stp 458, H-ben, 105 cm djup, i kontakt	Vertikalt, 0,5 m utanför ramstänger, övre delen på ca 1 m djup	1,1

Tabell 12. Sammanställning av installerade provplåtar samt korrosionshastighet på stagförankringar.

892	RL6 S9 stp 33, stag 2a, ca 120 cm djup, ej kontakt		16,5
893	RL6 S9 stp 33, stag 2a, 90 cm djup, i kontakt	Parallellt med staget med undre delen vid botten	5,2
901	RL6 S9 stp 33, stag 2a, 157 cm djup, i kontakt	Parallellt med staget med undre delen vid botten	0,2
900	RL6 S9 stp 33, stag 3a, 120 cm djup, ej kontakt		15,3
902	RL6 S9 stp 33, stag 3a, 76 cm djup, i kontakt	Horisontellt, ca 20 cm utanför staget och vid botten	-0,2 (!)
903	RL6 S9 stp 33, stag 3a, 155 cm djup, i kontakt	Horisontellt, ca 20 cm utanför staget och vid botten	-0,5 (!)
896	Optokabelstolpe vid RL6 S9 stp 33, 1 m djup, ej kontakt		9,0
899	Optokabelstolpe vid RL6 S9 stp 33, 1 m djup, i kontakt	Horisontellt, snett ut från staget och vid botten på ca 1 meters djup	0,4

Vi upptag av provplåtar mättes elektrokemiska potentialen och anodström genom anodkablarna. De uppmätta värdena ses i tabell 13-15.

Tabell 13. Uppmätta potentialvärden och anodströmmar A-stolpe

Objekt	Elektrokemisk potential mot koppar/kopparsulfatreferens (mV)	Anodström (mA)	Anmärkning
Ramstång 1a	-1200		
Jordlina vid 1a	Ca 0		
Anod vid 1a		13	
Anod vid 1d		9	
Provplåt vid 1a, kontakt (894)	-1300		
Provplåt vid 1a, ej kontakt (895)	-800		
Provplåt vid 1d, kontakt (897)	-1300		
Provplåt vid 1d, ej kontakt (898)	-860		

Tabell 14. Uppmätta potentialvärden och anodströmmar på B-stolpe.

Objekt	Elektrokemisk potential mot koppar/kopparsulfatreferens (mV)	Anodström (mA)	Anmärkning
Anod mot 1a		80	
Anod mot 1b		90	
Anod mot 1c		90	
Anod mot 1d		75	
Ramstång 1a	-1123		
Ramstång 1d	-1120		
Anod mot 2a		67	
Anod mot 2b		40	
Anod mot 2c		84	
Anod mot 2d		55	
Ramstång 2a	-1200		
Provplåt mot 1a (890)	-1200		
Ramstång 2c	-1180		
Ramstång 2d	-1155		
Provplåt mot 2c (885)	-1165		
Provplåt mot 2d (886)	-1136		

Tabell 15. Uppmätta potentialvärden och anodströmmar på trästolpar.

Objekt	Elektrokemisk potential mot koppar/kopparsulfatreferens (mV)	Anodström (mA)	Anmärkning
Stag optokabelstolpe	-1050		
Provplåt i kontakt med stag	-1050		
Provplåt ej kontakt	-560		
Anod	-1050		
Stag 2a	-1170		
Provplåt i kontakt med stag	-1169		
Provplåt i kontakt med stag	-1169		
Provplåt ej kontakt	-668		
Anod	-1169		
Stag 3a	-1012		
Provplåt i kontakt med stag	-1013		
Provplåt i kontakt med stag	-1013		
Provplåt ej kontakt	-703		
Anod	-1013		

Tångamperemetern fungerade inte på detta ställe. Troligen beroende på för stora induktionsstörningar.

Av ovanstående kan följande visas:

- I samtliga fall i försöket fungerar det att installera katodiskt korrosionsskydd med offeranod av magnesium på kraftledningsstolpar, både på stålstolpar och på stagförankringar till trästolpar.

- Det nödvändiga antalet anoder enligt de teoretiska beräkningarna stämmer överens med verkligheten.
- I fält uppmätta strömutmatningarna var lägre än de teoretiska beräkningarna vilket är gynnsamt då skydd kan erhållas med färre antalet anoder.
- Den bästa skyddseffekten erhålls om anoderna placeras så långt ner som möjligt.
- Vid installation av KKS minskar korrosionshastigheten mindre vid högre resistivitet på jorden än vid lägre resistivitet på jorden. (jämför stolpe 465 med högre resistivitet med stolpe 458 med lägre resistivitet)
- Om jordresistiviteten är lägre än 100 Ω m fungerar katodisk skydd bra. Även vid högre resistivitetsvärden kan det fungera men då måste grundvattennivån stå utmed fundamentet/staget och jordarten får inte bestå av sand, grus eller annat grövre material.
- Rekommendationen för A-stolpe är att placera en anod liggande parallellt med balken på varje sida, ca 50 cm utanför balken. Detta innebär att varje ramben ska ha totalt 2 anoder.
- På B-stolpe med anoder snett ut från ramstängerna minskade korrosionshastigheten vid korrosionsangreppet på 140 cm djup med 4-6 ggr och vid balken oändligt många gånger.
- Rekommendationen för B-stolpar är att anoderna placeras liggande från varje ramstång och snett ut från ramstången i jämnhöjd med balken.
- Rekommendationen för stagförankringar är att placera en anod per stagförankring, horisontellt från staget och utåt i jämnhöjd med grundbulten.
- Om topplinan är isolerad kan två centralt placerad anod skydda hela stolpplatsen, vilket verifierats i tidigare undersökningar på CL11 S6-7.

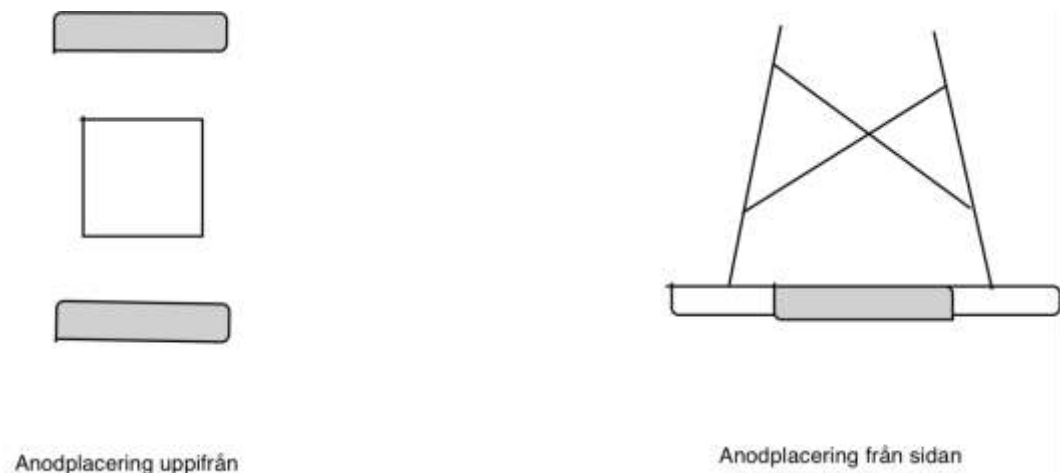
7 Installationsanvisning

Följande frågor ska besvaras innan installation utförs:

1. Vad har stolpen för konstruktion? A-stolpe, B-stolpe, stag till trästolpe eller någon annan konstruktion. För de tre första fallen gäller denna instruktion. Om konstruktionen faller utanför bör expertis kontaktas före installation. För stag till stålstolpar används anvisningen nedan för stag till trästolpar (kapitel 7.3).
2. Vad är värdet på stolpplatsens jordresistivitet? I normalfallet passar katodiskt skydd bäst om värdet är lägre än 100 Ωm .
3. Har stolpe/staget kontakt med kopparjordning? Detta kan bland annat erhållas ur potentialvärdet mätt både på stolpe/stag och på jordningslinan. Om det har kontakt med kopparjordning måste denna brytas före installation.
4. Finns det rostmåln kvar på konstruktionen? På stålstolpar kan man räkna med att rostmålnen är max 2 mm. Därför installeras offeranoder när lägst uppmätta dimension ligger mellan 1 och knappt 2 mm. För stag gäller att stagförankringen ska hålla minst samma påkänning som staglinan. Detta kräver beräkningar. Hur mycket rostmåln som sedan ska läggas till bestäms av ägarna.
5. Är topplinan isolerad? I så fall installeras enligt kapitel 7.4.

7.1 A-stolpe

- Gräv en fåra ner till balken, parallellt med denna, och ca 50 cm utanför.
- Placera en anod på varje sida om stolpen, dvs totalt två anoder på varje stolpben, se figur 17.

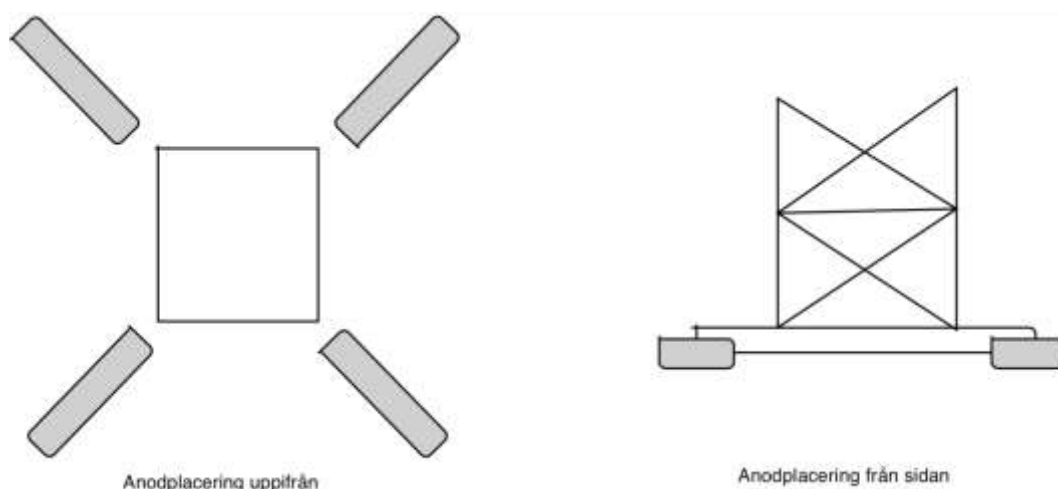


Figur 17. Två anoder placeras horisontellt vid balkarna.

- Trä en perforerad, gul skyddsslang över kabeln.
- Se till att kabel med skyddsslang placeras inne i stolpbenet.
- Sätt fast kabeln i antingen befintligt hål i stolpen alternativt borra ett nytt hål i ramstången ca 10-20 cm under markytan. (Detta på grund av stöldrisken) Använd brickor för att skydda det varmförzinkade skiktet. Om nytt hål borrar spreja omedelbart efter med kallgalv på ren yta i hålet. (En undersökning utförs just nu där man provar olika färgsystem för reparation av skadat zinkskikt, resultatet är inte klart än).
- Se till att det finns möjlighet för kabeln att sträckas efter igenfyllning.
- Installera kontrolltråd med årtalsbricka.
- Fyll igen under uppsikt.
- Installera en bricka ovan mark där det står Katodiskt korrosionsskydd på.

7.2 B-stolpe

- Gräv fåror ner till balken från ramstängerna och snett utåt.
- Placera en anod horisontellt i varje hörn enligt figur 18, dvs totalt fyra anoder på varje stolpben.



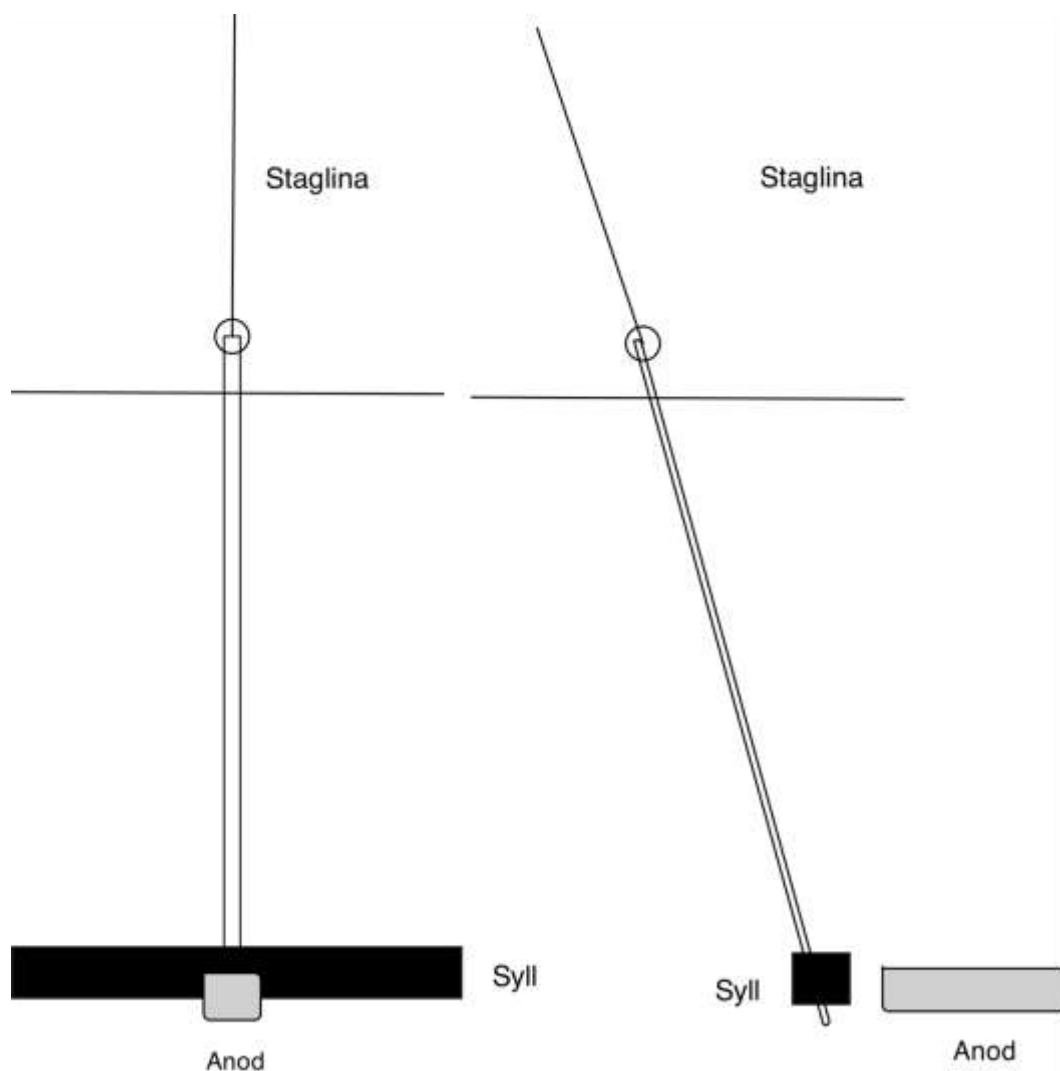
Figur 18. Fyra anoder placeras horisontellt vid balken.

- Trä en perforerad, gul skyddsslang över kabeln.
- Se till att kabel med skyddsslang placeras inne i stolpbenet.
- Sätt fast kabeln i antingen befintligt hål i stolpen alternativt borra ett nytt hål i ramstången ca 10-20 cm under markytan. (Detta på grund av stöldrisken) Använd brickor för att skydda det varmförzinkade skiktet. Om nytt hål borrar spreja omedelbart efter med kallgalv på ren yta i hålet. (En undersökning utförs just nu där man provar olika färgsystem för reparation av skadat zinksikt, resultatet är inte klart än).
- Se till att det finns möjlighet för kabeln att sträckas efter igenfyllning.
- Installera kontrolltråd med årtalsbricka.
- Fyll igen under uppsikt.
- Installera en bricka där det står Katodiskt korrosionsskydd på.

7.3 Trästolpe med stag

Erfarenheten ger om det är mest ekonomiskt att byta stagförankringen helt i stället för att installera en anod. Om anod ska installeras görs detta enligt följande:

- Gräv en fåra ner till syllen från staget och utåt.
- Placera en anod horisontellt och ut från stagförankringen, se figur 19.



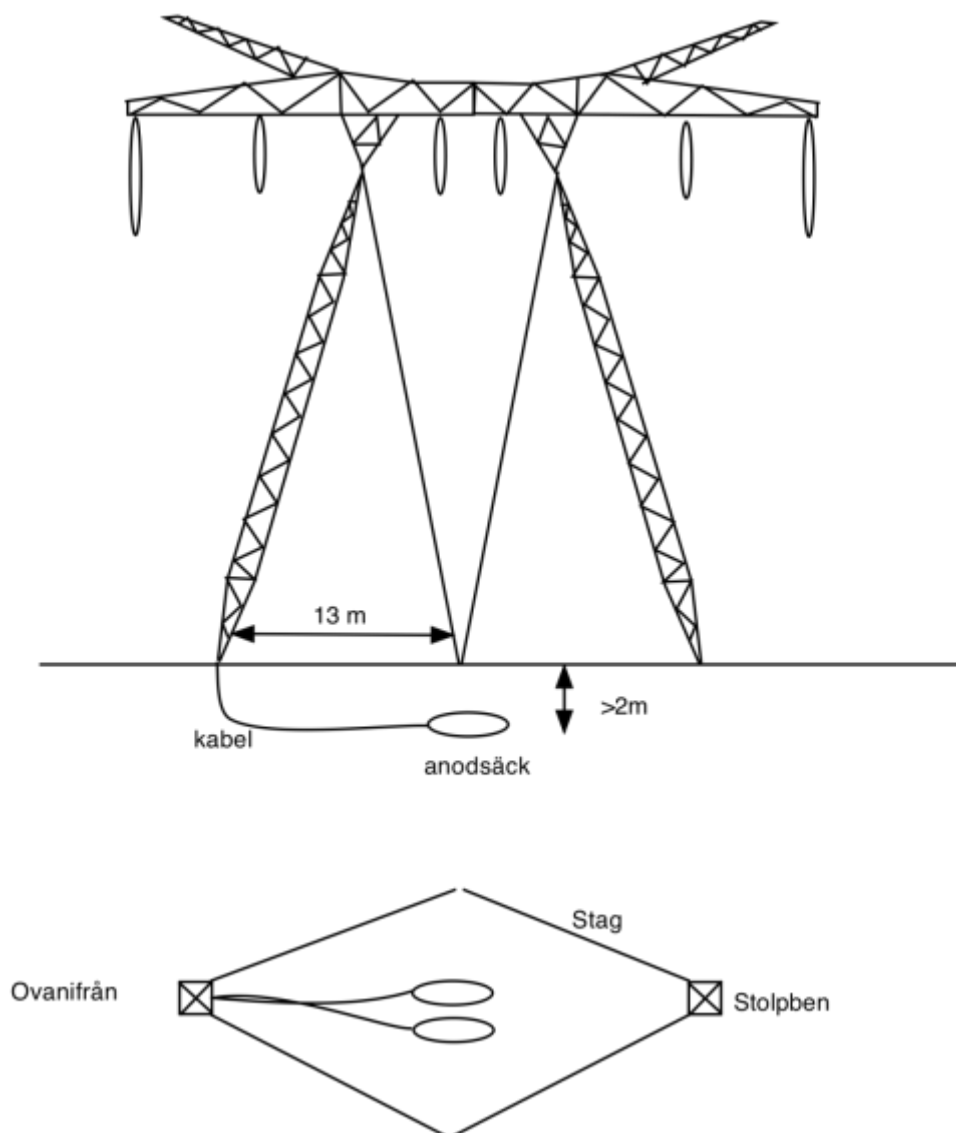
Figur 19. Anoden placeras ut från stagförankringen.

- Trä en perforerad, gul skyddsslang över kabeln.
- Sätt fast kabeln på lämpligt sätt. Hur beror på konstruktionen och får avgöras från fall till fall. För att minska stöldrisker föreslås att kabeln installeras under jord. Detta kan lämpligen utföras genom att använda till exempel en varmförzinkad avgasklämma av lämplig storlek. Kabelskon kläms fast mellan avgasklämman och stagförankringen.
- Se till att det finns möjlighet för kabeln att sträckas efter igenfyllning.
- Installera kontrolltråd med årtalsbricka.
- Fyll igen under uppsikt.
- Installera en bricka där det står Katodiskt korrosionsskydd på.

7.4 Stolpe med isolerad topplina

Eftersom topplinorna är isolerade från stolparna går det utmärkt att installera galvaniska katodiska skydd på varje stolpplats. Nedan visas installationsanvisning för CL11 S6-7.

På varje stolpplats består skyddet av två offeranoder i magnesium som via kabel monteras i ett stolpben. Anodernaplaceras så långt som möjligt från stolpens stålkonstruktioner, se figur 20.



Figur 20. Anoderna placeras i mitten av stolpplatsen.

Två anoder per stolpplats placeras liggande på ca 2 meters djup. Varje anod fästs i ett stolpben via kabel. Bricka krävs om hålet är stort. De två kablarna

från anoderna får tillsammans gå i en gul skyddsslang de sista 1,5 metrarna, se figur 22.

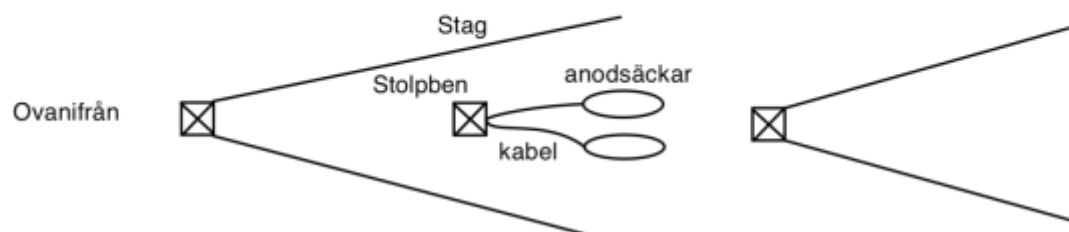
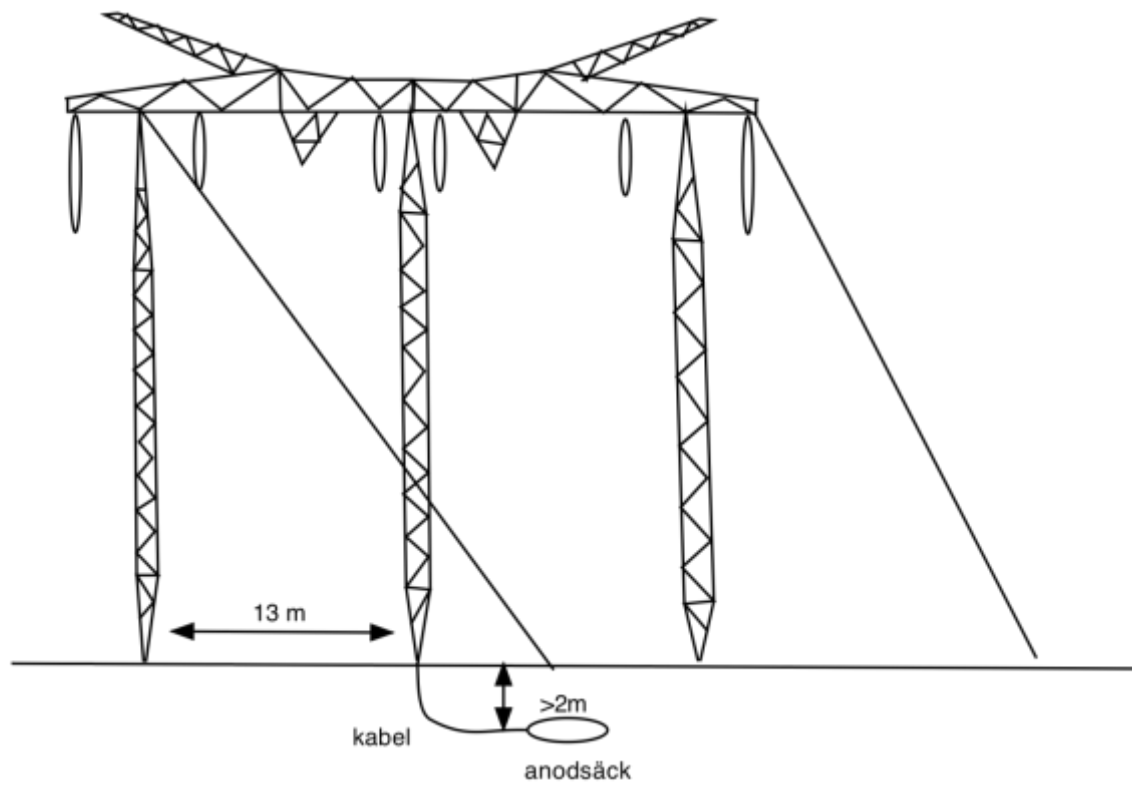


Figur 22. Montering av kablar i stolpbenet.

Om det finns risk för stöld monteras kablarna under markytan.

Observera att det är mycket viktigt att kablarna inte blir för sträckta efter jorden har lagts tillbaka. Det måste också finnas plats att lägga en tångamperemeter runt kablarna nära infästningen i stolpen.

Om en stolpe består av tre ben med stag placeras 2 anoder enligt skiss figur 23.



Backfillens inverkan på övergångsmotståndet

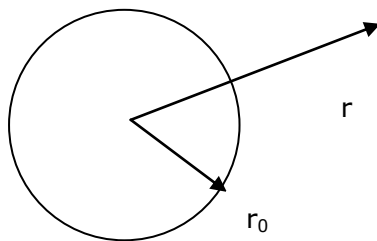
Bilaga A

Som en förenkling studerar vi en sfärisk anod placerad på stort djup dvs markytan inverkar inte på strömfältet runt anoden.

Strömmen från anoden, I , flyter radiellt i ett symmetriskt fält.

$$E = \rho \cdot J = \frac{\rho \cdot I}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \quad (1)$$

där ρ är resistiviteten i den omgivande jorden, J strömtätheten och r avståndet, se figuren nedan.



Potentialen φ i positionen r relativt avlägsen jord ($r \rightarrow \infty$) ges av:

$$\varphi = \int_r^{\infty} E \cdot dr = \frac{\rho \cdot I}{4 \cdot \pi} \int_r^{\infty} r^{-2} dr = \frac{\rho \cdot I}{4 \cdot \pi \cdot r} \quad (2)$$

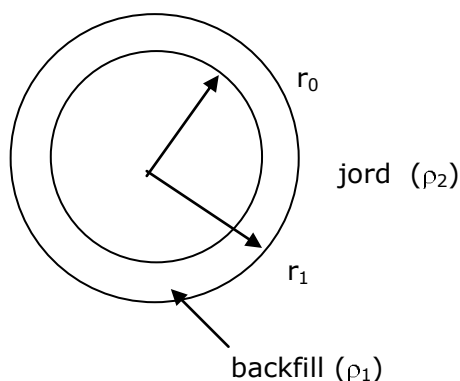
Spänningen U_0 vid anodens yta ges av $r = r_0$:

$$U_0 = \varphi_{r_0} = \frac{\rho \cdot I}{4 \cdot \pi \cdot r_0} \quad (3)$$

Övergångsmotståndet, R , för den sfäriska anoden blir då:

$$R = \frac{U_0}{I} = \frac{\rho}{4 \cdot \pi \cdot r_0} \quad (4)$$

Med en backfill runt anoden kommer resistiviteten att variera med avståndet r . Vi måste då utföra ovanstående integration över två segment, se figuren nedan.



$$\begin{aligned} \varphi_0 &= \int_{r_0}^{r_1} E_1 dr + \int_{r_1}^{\infty} E_2 dr = \frac{\rho_1 \cdot I}{4 \cdot \pi} \int_{r_0}^{r_1} r^{-2} dr + \frac{\rho_2 \cdot I}{4 \cdot \pi} \int_{r_1}^{\infty} r^{-2} dr = \\ &= \frac{\rho_1 \cdot I}{4 \cdot \pi} \left| \left(\frac{1}{r} \right) \right|_{r_0}^{r_1} + \frac{\rho_2 \cdot I}{4 \cdot \pi} \left| \left(\frac{1}{r} \right) \right|_{r_1}^{\infty} = \frac{I \cdot \rho_1 \cdot r_1 - \rho_1 \cdot r_0 + \rho_2 \cdot r_0}{4 \cdot \pi \cdot r_0 \cdot r_1} \end{aligned} \quad (5)$$

Vilket ger övergångsmotståndet:

$$R = \frac{\rho_1 \cdot r_1 - \rho_1 \cdot r_0 + \rho_2 \cdot r_0}{4 \cdot \pi \cdot r_0 \cdot r_1} \quad (6)$$

Låt oss nu jämföra vilken effekt backfillen har på anodens övergångsmotstånd. Backfill har en resistivitet på 0,5 Ωm och jordens resistivitet varierar från 5 till 200 Ωm . Vid högre resistiviteter än 200 är det knappast någon ide att installera offeranoder eftersom strömvärdningen blir för låg. Anta att den sfäriska anoden har en radie på 0,1 m och backfillen ökar denna till 0,15 m. Detta ger följande ingångsdata:

$$\rho_1 = 0,5 \, \Omega\text{m}$$

$$\rho_2 = 5\text{-}200 \, \Omega\text{m}$$

$$r_1 = 0,1 \, \text{m}$$

$$r_2 = 0,15 \, \text{m}$$

$$R_1 = 0,1327 + 0,5308 \, \rho_2$$

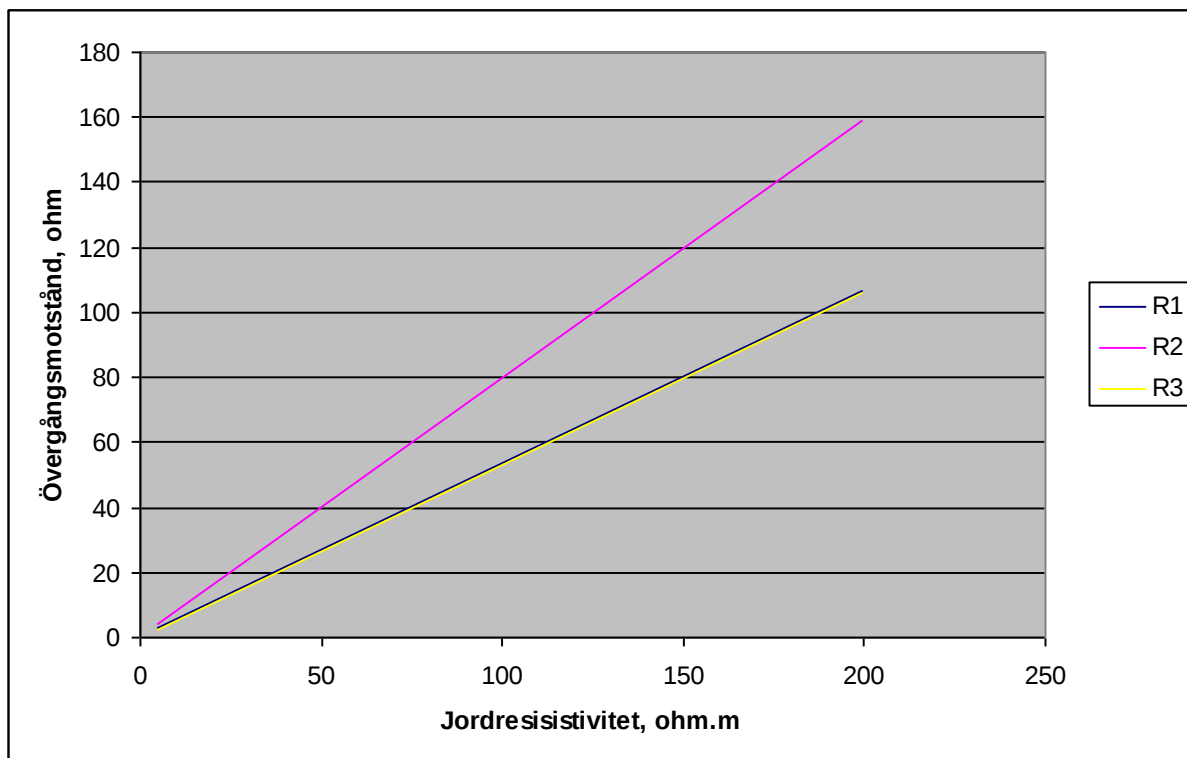
Detta ska jämföras med om vi beräknar övergångsmotståndet utgående från anodens radie (r_0) och omgivande jords resistivitet dvs bortser från backfillen.

$$R_2 = 0,7962 \, \rho_2$$

Alternativet är att beräkna övergångsmotståndet baserat på backfillens ytteryta (r_1) dvs att spänningsfallet i backfillen kan försummas, vilket ger:

$$R_3 = 0,5308 \, \rho_2$$

I nedanstående diagram jämförs de tre motstånden vid olika jordresistiviteter.



Överensstämmelsen mellan R1 och R3 är mycket god. Anodens övergångsmotstånd ska därför beräknas utgående från storleken på den omgivande backfillen dvs måtten på tygsäcken.

