

SoIEI 00-02

**Solcellsmatat katodiskt korrosionsskydd av
kraftledningsstolpar - fältprovning år
2000 - 2002**

Elforsk rapport 03:3

SoIEI 00-02

**Solcellsmatat katodiskt korrosionsskydd av
kraftledningsstolpar - fältprovning år
2000 - 2002**

Elforsk rapport 03:3

SOLEI 00-02

Solcellsmatat katodiskt korrosionsskydd av kraftledningsstolpar - fältprovning år 2000 - 2002

Elforsk rapport 03:3

Märit Forssander

Bertil Sandberg



Charlotte Persson



Roland Lundberg



Al-företagen, energiföretag via Elforsk, Energimyndigheten, Formas, Svenska Byggbranschens utvecklingsfond och White Arkitekter finansierar SOLEI 00-02.

Sammanfattning

En stor del av kraftledningsnätet i Sverige består av stål stolpar som sträcker sig ner ca 2 meter i marken och står förankrade direkt i jord. Uppskattningsvis finns det ca 50.000 sådana stolpar i Sverige. I likhet med andra stålföremål korroderar stolpfundamentet när det utsätts för den fuktiga jorden. Om inte fortsatt korrosion motverkas kommer hållfastheten hos fundamenten att försvagas. För att skydda stolparna mot korrosionsangrepp är dessa ofta varmförzinkade. De är dessutom något överdimensionerade så att en viss avfrätning kan tillåtas. Allteftersom kraftledningsnätet åldras kommer dock fler och fler kraftledningsstolpar att vara i ett sådant skick att det krävs åtgärder för att förstärka befintligt korrosionsskydd på de delar som är exponerade för jord. Senare års undersökningar har också visat att yngre stolpar är, på grund av sin konstruktion, mer känsliga för korrosionsangrepp än äldre så att dess hållfasthet äventyras betydligt tidigare än de äldres. På senare år har omfattande undersökningar, som inneburit friläggning och inspektion av stolpfundament bekräftat detta.

Med anledning av detta har Elforsk genomfört ett projekt med målet att optimera framtida underhållskostnader. En av de åtgärdsmetoder som har visat sig vara mest lovande är katodiskt skydd vilket har provats i flera försök. I ett av dessa försök har två kraftledningsstolpar skyddats med solcellsmatad katodiskt korrosionsskydd. Resultatet efter två års drift, som redovisas i Elforskrapport nr 99:16 (1), visade att det är fullt möjligt att korrosionsskydda en kraftledningsstolpe med hjälp av solcellsmatad katodiskt korrosionsskydd och att det dessutom är en presumtiv metod att använda även rent ekonomiskt.

Efter detta inledande försök beslöts att ett fullskaleförsök skulle utföras främst för att optimera skyddet så att det slutgiltigt blir en kommersiellt gångbar metod. Optimeringen innebär att även solcellen utvärderas. Denna rapport redovisar utförande och resultat av fullskaleprov på 10 stolpplatser. Projektet har varit ett samarbetsprojekt mellan Korrosionsinstitutet, CarlBro Energikonsult AB och ElektroSandberg Mätteknik AB. Projektet har varit en del av Solel 00-02 och med tilläggsfinansiering av Svenska Kraftnät.

Undersökningen visar att bäst skydd erhålls tre stolpar från ytterkanten, dvs den fjärde stolpen som skyddas får bäst skydd. Detta bör beaktas vid projekteringen. När en serie av stolpar skall skyddas går det däremot bra att hoppa över flera stolpplatser då de står i mycket högresistiv jord och som då inte anses behöva skydd.

Metoden har visat sig vara enkel att installera, robust och hållbar. Både anoden och solcellen beräknas ha ca 30 års livslängd. Om man beaktar växelströmskorrosion är slutsatsen att skyddet i genomsnitt halverar korrosionshastigheten vilket innebär en fördubbling av livslängden. Installation av solcellsmatad katodiskt korrosionsskydd bidrar också positivt till miljön, dels genom en förlängning av stolpens livslängd men också genom att det inte "läcker ut" några miljöstörande ämnen i naturen från skyddet. Det till och med motverkar läckage av kadmium eftersom varmförzinkningen i jorden bibehålls på stolpen.

Problemet är att metoden har visat sig vara något dyr. Det är framför allt kostnad för material som är hög. I fältprovnings ingick 16 stolpar, varav endast tio behövde skyddas. Detta är troligen en realistisk situation att var tredje kan hoppas över. Enligt studiens kostnadsanalys kostar trettio skydd som projekteras samtidigt för samma stolpsträcka ca 500 000 SEK. Det kan jämföras med kostnaden för en alternativ anodbäddinstallation som beräknas till ca 300 000:-. Detta innebär solcellstekniken har svårt att konkurrera ekonomiskt om det går att skydda stolparna med anodbädd. Så är dock inte alltid fallet, då anodbädd kräver speciella förhållanden där ett så kallat riskområde bestäms. Inom detta riskområde får inte främmande konstruktioner finnas (elkablar, telekablar, jordförlagda rör osv). I de fall där riskområdet inte kan accepteras är solcellsmatat katodiskt korrosionsskydd av varje stolpplats den mest fördelaktiga metoden.

Inom projektet har en tillämpningsinstruktion för skyddsmetoden utarbetats.

Skyddsverkan med solcellsmatat katodiskt korrosionsskydd är sämst på vintern. Det finns dock inga publicerade undersökningar utförda som kan ge ett entydigt svar på vilken årstid som har den högsta korrosionshastigheten på varmförzinkat stål. Det skulle kunna vara mycket intressant kunskap för att ytterligare klarställa metodens konkurrenskraft.

Summary

The national grid in Sweden consists of about 40 000 steel towers which is grounded two meters under the surface. The steel towers are buried in the ground and are therefore directly exposed to a variety of different soils. A steel object buried in the ground is subjected to corrosion under much more complicated conditions than in the air.

To protect the steel from corrosion the steel towers are often galvanized and an extra dimension are added.

It is now obvious that in the future pylons will fall caused by corrosion. During the last decade investigations has shown that it is not necessarily the oldest pylons that will fall in the first place.

A project was started with Elforsk as mentor with the goal to minimise and optimise the maintenance of ageing underground parts of the towers. The first part of the project has led to a working scheme on how to identify risk tower who has to be treated due to corrosion. The second part treats different methods to suppress the corrosion damage on those towers who are subjected to corrosion damage.

One of the most promising methods is cathodic protection. Many different types have been tried since the middle of the 50's. Originally the protection current was emerged from sacrificial anodes but in 1997 two pylons was treated with cathodic protection with current emerging from solar panels. In October 2000 this project was extended to ten pylons with two solar panels in each tower, one for each leg.

This report summarizes the result from this last project when twenty systems, each composing of one solar panel feeding current to one inert anode buried in the middle of the tower leg.

The effect from the protection method has been measured in two ways:

1. The protection potential has been measured
2. The protection effect on preweighted steel plates has been measured by taking the difference after two years of exposure in weight between plates in contact and not in contact with the protection method.

The result shoves that the method works and that the method can be used to protect steel pylons from corrode in the underground parts.

An instruction is also written which will help when dimensioning and ordering the method.

Finally, it is stated that the copper earthing is not effected to much by the method.

Innehållsförteckning

1	BAKGRUND	2
2	SYFTE	3
3	MÅL	4
4	INLEDNING	5
5	KATODISKT SKYDD - TEORI	6
6	TIDIGARE FÖRSÖK UTFÖRT 1996 – 1998	11
6.1	IDENTIFIERADE PROBLEM	13
7	GENOMFÖRANDE	14
7.1	PROJEKTERING	14
7.2	TEKNISK UTFORMNING	16
7.3	UTRUSTNING FÖR KONTROLL AV SKYDDSVERKAN	20
8	RESULTAT	21
8.1	RESULTAT FRÅN MÄTNINGAR	21
8.2	RESULTAT FRÅN EXPONERING AV PROVPLÅTAR	22
8.3	DISKUSSION AV RESULTATET	23
9	UTVÄRDERING AV SOLCELLENS FUNKTION	25
10	EKONOMI	27
11	MILJÖ	29
12	TILLÄMPNINGSINSTRUKTION	30
13	KOMPLETTERING AV SOLCELL PÅ STOLPE FRÅN TIDIGARE FÖRSÖK ...	31
14	KOMPLETTERANDE UTVECKLING	32
15	DISKUSSION OCH SLUTSATSER	33
16	REFERENSER	34

Bilagor

A	MÄTRESULTAT
B	RESULTAT FRÅN EXPONERING AV PROVPLÅTAR
C	TILLÄMNINGSINSTRUKTION KATODISKT SKYDD MED SOLCELLER
D	SOLCELLSDATABLAD
E	FIGUR ÖVER INSTALLATIONEN
F	BERÄKNING AV VÄXELSTRÖMSKORROSION PÅ PROVPLÅTAR

1 Bakgrund

Kraftledningsstolpars fundament och förankringsstag av stål är utsatta för korrosionsangrepp på de delar som är exponerade för fuktig jord. För att skydda stolparna mot korrosionsangrepp är dessa ofta varmförzinkade. De är dessutom något överdimensionerade så att en viss avfrätning kan tillåtas. Allteftersom kraftledningsnätet åldras kommer fler och fler kraftledningsstolpar att vara i ett sådant skick att det krävs åtgärder för att förstärka befintligt korrosionsskydd på de delar som är exponerade för jord. Senare års undersökningar har också visat att yngre stolpkonstruktioner, på grund av sin konstruktion, är mer känsliga för korrosionsangrepp än äldre så att dess hållfasthet äventyras betydligt tidigare än de äldres.

Med anledning av detta har Elforsk genomfört ett projekt med målet att optimera framtida underhållskostnader. En av de åtgärdsmetoder som är mest lovande är katodiskt skydd vilket har provats på olika sätt i flera försök.

I ett av dessa försök har två kraftledningsstolpar skyddats med solcellsmatat katodiskt korrosionsskydd. Detta innebär att solcellen producerar en ström som matar en inert anod placerad i stolpbenet. Solcellens minuspol är kopplad till stolpen och pluspolen till anoden, strömkrets bildas där stålet är i kontakt med marken och skyddas genom att utgöra katod i denna krets. Resultatet efter två års drift, som redovisas i Elforskrapport nr 99:16 [1], visade att det är fullt möjligt att korrosionsskydda en kraftledningsstolpe med hjälp av solcellsmatat katodiskt korrosionsskydd och att det dessutom är en metod som även ekonomiskt står sig väl mot övriga skyddsmetoder.

Med detta resultat som bakgrund beslöts att ett fullskaleförsök skulle utföras främst för att optimera skyddet så att det slutgiltigt blir en kommersiellt gångbar metod. Optimeringen innebär även att solcellen utvärderas. Denna rapport redovisar utförande och resultat av fullskaleprov på 10 stolpplatser.

Ett av de problem som identifierats är att den jordningslina av koppar som finns vid varje stolpe påverkas negativt av skyddet. I detta projekt var även målet att undersöka och föreslå en lösning på detta problem. Därför har stolpe och kopparlina kopplats ihop via en diod. Detta genomfördes på två stolpar. På en tredje stolpe var växelspanningen över gnistgapet för hög, vilket störde diodens funktion. Dioden skall förhindra galvanisk korrosion mellan stolpe och jordlina när skyddet inte är aktivt. När skyddet är i aktiv drift kopplas kopparlinan ihop med stolpen via dioden och därmed skyddet, den skall då skyddas av det aktiva korrosionsskyddet.

Projektet har varit ett samarbetsprojekt mellan Korrosionsinstitutet, CarlBro Energikonstult AB och ElektroSandberg Mätteknik AB.

Projektet har varit en del av SolEl 00-02 och med tilläggsfinansiering av Svenska Kraftnät.

2 Syfte

Syftet är att optimera framtida underhåll av korrosion på kraftledningsstolpars fundament. Livslängden förlängs genom installation av katodiskt skydd.

3 Mål

Målet med projektet har varit att ta fram en kommersiellt fullt utvecklad metod att skydda kraftledningsstolpars jordfundament med hjälp av solcellsmatat katodiskt korrosionsskydd. Detta skall ske genom utveckling av tidigare framtagna metod samt utvärdering av själva solcellens funktion och kvalitet.

4 Inledning

Den ledningssträcka i mellansverige som installationen gjordes på valdes ut med hänsyn till ledningens ålder, konstruktion och jordart. Enligt "Skrivbordsmetoden" [2] bedömdes ledningssträckan således vara i ett sådant skick att den är i behov av förnyat korrosionsskydd (varmförzinkningen är i stor omfattning avfränt och stålet har börjat korrodera).

Ledningen är konstruerad med sk "portalstolpar", dvs varje stolpplats har två ben. På 10 stolpplatser har totalt 20 installationer (en i varje stolpben) av solcellsmatat katodiskt korrosionsskydd utförts. Installationen skedde i oktober 2000. Stolpplatserna har varit i serie. Ett fåtal stolpplatser hoppades dock över då dessa inte hade fundament nere i jorden utan stod på berg.

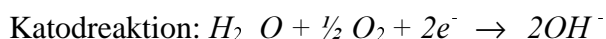
Vid projekteringen som föregick installationen utfördes provpolarisering på ett par stolpplatser för att se om de teoretiska beräkningarna på skyddets konfiguration och dimension stämde. Efter installationen har skyddsverkan mätts under två år och slutresultatet redovisas i denna rapport.

5 Katodiskt skydd - teori

Korrosion i jord är en mycket komplex process där många olika faktorer samverkar. Det går därför inte att förutsäga med vilken hastighet ett objekt kommer att korrodera på en viss plats. De faktorer som vanligtvis spelar störst roll är

- Vattenhalt
- Syretillgång
- Surhet
- Resistivitet

För att en metall skall korrodera i jord krävs dock vanligtvis närvaro av vatten (elektrolyt). Korrosionen är då av elektrokemisk natur vilket innebär att det vid korrosionen sker kemiska reaktioner där elektroner avlämnas av en reaktion och upptas av en annan. Dessa reaktioner sker vid anoden respektive katoden. Vid anoden sker upplösning av metallen varvid elektroner avges. Vid katoden upptas elektroner vilka reagerar med syre och vatten. Vid katoden förblir metallen intakt. Som exempel visas nedan korrosionen av järn varvid följande reaktioner sker:



Korrosionsströmmen, I , går mellan anod och katod enligt fig. 1.

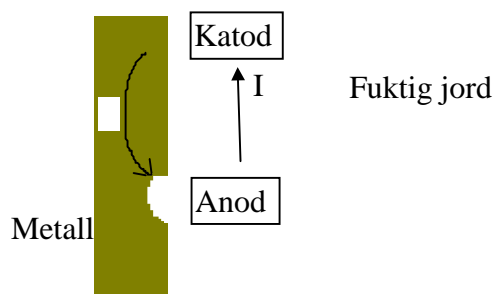


Fig. 1. Korrosionsströmmen går från anod till katod genom elektrolyten.

Om två olika ädla metaller nersänkta i elektrolyt kopplas ihop elektriskt blir den ena metallen anod och den andra katod. Galvanisk korrosion uppstår där den minst ädla metallen utgör anod och offras varvid elektroner överförs till den ädlare metallen som utgör katod och förblir intakt. När järn är elektriskt hopkopplat med koppar går korrosionsströmmen från järnet till kopparytan genom elektrolyten, se fig. 2.

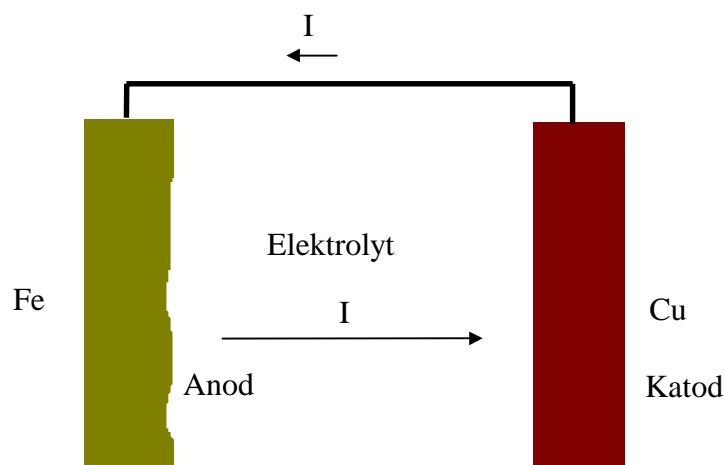


Fig. 2. Galvanisk korrosion av järn i elektrisk kontakt med koppar.

När stål skyddas med hjälp av katodiskt skydd sänks dess elektrokemiska potential från ca - 600 mV till lägre än - 850 mV mätt mot koppar-kopparsulfatreferenselektrod. Stålet är då passiverat vilket kan ses i ett potential- pH diagram för järn [3] Det är viktigt att hela konstruktionen erhåller potentialvärde under -850 mV för att ett fullständigt skydd skall erhållas. För övriga metaller gäller att potentialen skall sänkas med -250 till -300 mV jämfört med potentialen för metallen i oskyddat tillstånd, den så kallade korrosionspotentialen. Även om det är önskvärt att sänka potentialen till lägre än -850 mV leder ändå varje sänkning till lägre korrosionshastighet (och längre livslängd på objektet).

Katodiskt skydd med offeranoder

Att en metall ”offrar” sig för en annan metall enligt ovanstående utnyttjas vid katodiskt korrosionsskydd med strömmatning på galvanisk väg med hjälp av galvaniska anoder (offeranoder). Den metall som skall skyddas kopplas då ihop elektriskt med en mindre ädel metall enligt ovan, vanligtvis magnesium eller zink, varvid denna korroderar. Vid korrosionen avges ström, skyddsström, till det objekt som skyddas.

Anoden kan vara av typen näranod eller fjärranod. Vid användning av näranoder ligger anoden så nära konstruktionen att det spänningsgradientfält, som omger anoden, innesluter konstruktionen, se fig. 3 och 4. Fjärranod innebär att anoden ligger på så stort avstånd från konstruktionen att denna inte innesluts av anodens spänningsgradientfält. Anoden är då placerad flera/många meter utanför stolpen som skall skyddas.

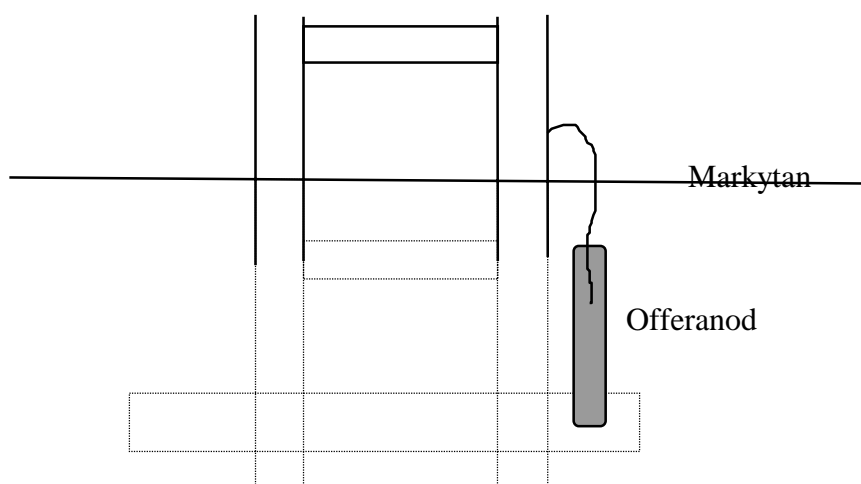


Fig. 3. Stolpe med katodiskt skydd utan påtryckt ström. Offeranoden nära konstruktionen.



Fig. 4. Två magnesiumanoder kopplade i serie nergrävs vid stolpfundament.

Det finns främst två villkor som måste vara uppfyllda för att ett katodiskt skydd med offeranoder skall fungera. Dessa är:

Den oädla metallen skall ligga tillräckligt ”långt ifrån” den skyddade metallen i den sk elektrokemiska spänningsserien [3] . Om den ligger för nära uppstår inte tillräckligt stor drivande kraft i spänningsskillnaden för att få ett effektivt skydd. Ligger potentialerna

däremot för långt ifrån varandra skyddar visserligen offeranoden, men den tar slut snabbt och måste bytas ofta.

Jordresistiviteten måste vara tillräckligt låg för att kunna leda strömmen som uppstår. I praktiken innebär det att resistiviteten bör ligga under $40 \Omega\text{m}$ för att offeranoden skall fungera tillfredsställande.

Katodiskt skydd med påtryckt ström

Offeranoden kan bytas ut mot en inert anod, men denna måste då erhålla ström från en extern strömkälla för att skyddet skall kunna fungera.

Katodiskt skydd med påtryckt ström består således av anod som, via en extern strömkälla, kopplas till den konstruktion som skall skyddas. Anodmaterialet är ofta inert, t.ex. platinerad tråd, men kan även bestå av t.ex. järn. Den inerta anoden matas med ström vilket innebär att strömmen sedan går till skyddsobjektet via elektrolyten (jorden med en viss fukthalt). Vid skyddsobjektet sker då konsumtion av syre, se fig. 5.

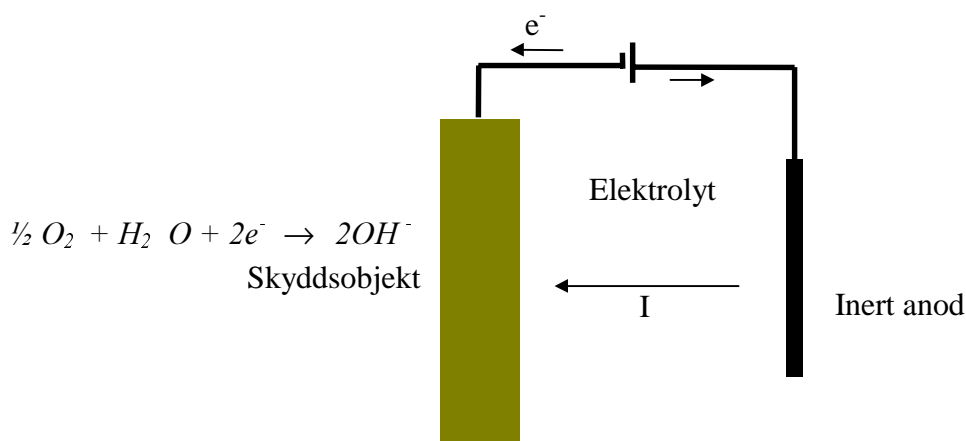


Fig. 5. Katodiskt skydd med påtryckt ström.

För att sänka motståndet i kretsen bäddas anoden in i något fyllnadsmaterial som ger lågt övergångsmotstånd mellan anod och jord, t.ex. koks. Strömkällan består vanligtvis av en likriktad nätspanning. Strömbehovet beror främst av skyddsobjektets ystorlek samt av jordresistiviteten. För rent stål i jord är strömbehovet vanligtvis mellan 10 och 100 mA/m^2 [4]. Den spänning som krävs beror främst på jordresistiviteten samt övergångsmotståndet från anoden till jord. Ett vanligt värde på erforderlig polspänning är ca 4 V. Det krävs således en förhållandevis liten effekt för att driva ett katodiskt skydd. Som exempel kan nämnas att för att skydda 10 m^2 stål i jord med låg resistivitet krävs endast ca 2-5 W.

När den elektriska matningen sker från distributionsnätet via en likriktare används ofta fjärranoder, vilket innebär att ett stort antal anoder grävs ner på samma ställe och bildar en så kallad anodbädd. Denna placeras på tillräckligt stort avstånd från skyddsobjektet för att inte omfattas av anodens spänningsgradienter. Anoderna matas med ström via

likriktaren. Likriktarens minuspol kopplas till en stolpe. Tack vare att stolparna är förbundna elektriskt med varandra via topplina kan sedan skyddsströmmen regleras så att många stolpar kan skyddas från samma anodbädd. Detta system är installerat på en kraftledningssträcka i mellansverige.

När enstaka stolpar på en kraftledning skall skyddas är det mest ekonomisk att installera skyddet lokalt på de stolplatser som behöver skydd och lämna övriga utan skydd. Eftersom det enligt ovan krävs liten effekt för skydd passar solcellsmatning utmärkt.

6 Tidigare försök utfört 1996 – 1998

På en av stolpplatserna installerades en inert anod mellan de två stolpbenen. Den strömmatande solcellen placerades uppe i det ena stolpbenet, se fig 6.

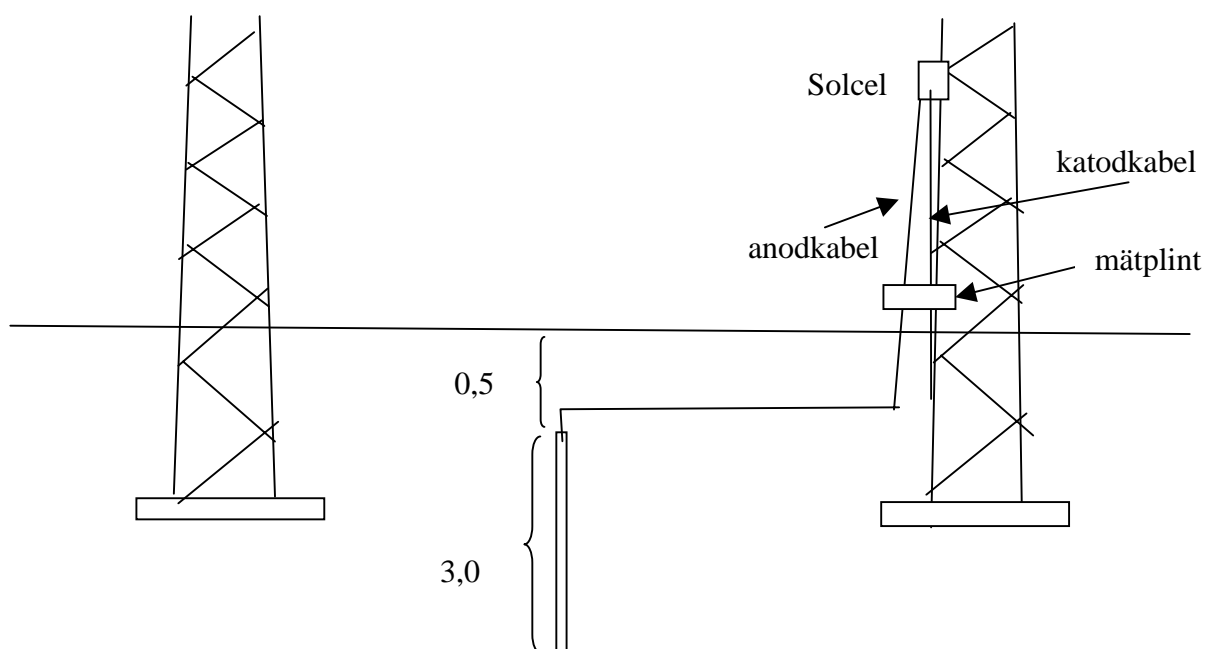


Fig.6 Installation av solcellsmatad katodiskt korrosionsskydd (stolpplats 114).

Solcellen är av kristallin typ, från Marin Sunware och har en effekt på 25W (16,5 V / 1,5 A). Den visade sig vara mycket känslig för partiell skugga, när t ex en faslina skuggade solcellen sjönk effekten betydligt trots starkt solsken (sk cellblockering).

På den andra stolpplatsen, 117 installerades anoden inne i ett stolpben. Den strömmatande solcellen placerades i samma stolpe, se fig 7.

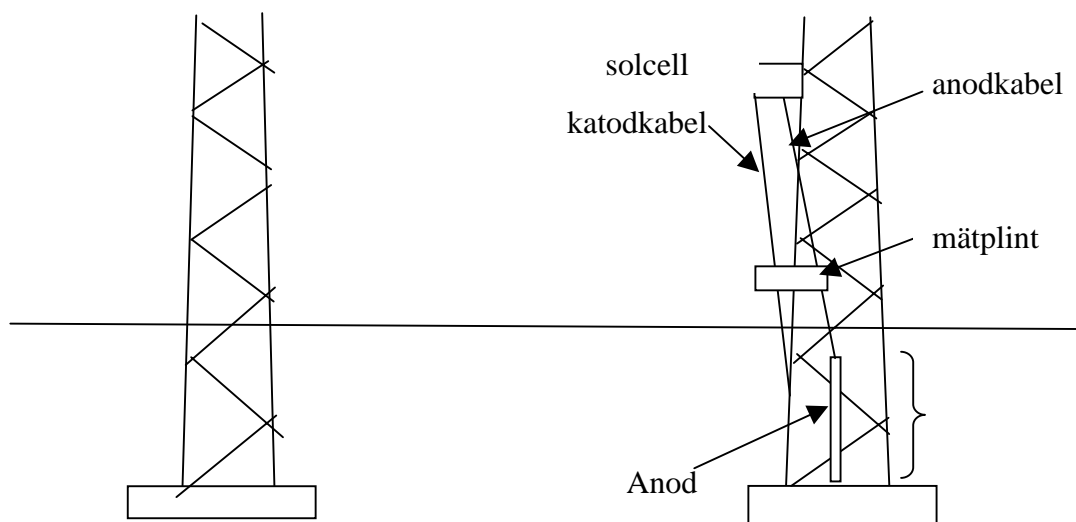


Fig.7 Installation av solcellsmatad katodiskt korrosionsskydd (stolpplats 117).

Solcellen består av en flexibel tunnfilmspanel för marint bruk, med en effekt på 11W (15,6 V / 0,7 A). Den var inte känslig för partiell skugga och strömmatningen var relativt bra även vid molnigt väder. Solcellen monterades ca sju meter upp i stolpen i 45° vinkel på en specialtillverkad aluminiumplatta.

Från solcellen gick sedan anodkabel och katodkabel partvinnade till en mätplint. I plinten kopplades anodkabeln till en kabel från den inerta anoden och katodkabeln kopplades till en kabel som fästes med en fastsvetsad skruv i stolpbenet ca 0,5 meter under marknivå.

Eftersom solcellen matar ström endast på dagen kommer skyddet inte att kunna fungera på natten. Detta skulle kunna lösas genom att installera batterier som laddas av solcellen. I detta fall valdes att inte installera batterier för att minimera risken att det skulle bli problem med batterierna och kringutrustningen för uppladdning vilket skulle innebära att utvärderingen försvårades.

Utvärderingen av skyddsverkan gjordes på två olika sätt:

1. Förvägda provplåtar grävdes ner samtidigt med installationen av solcellen. Efter 1,5 år togs de upp och vägdes på nytt.
2. Den elektrokemiska potentialen mättes dels vid enstaka tillfällen och dels kontinuerligt under en till två månader.

Resultatet från detta försök var att det går att skydda kraftledningsstolpar med hjälp av solcellsmatad katodiskt korrosionsskydd. Den konstruktion som fungerade bäst var den

där anoden placerades inne i ett stolpben (se stolpe 117). För den andra stolpplatsen (114) var solcellen mycket känslig för skugga och delvis även underdimensionerad.

6.1 Identifierade problem

De problem som kunde identifieras i en analys innan utvärderingen av projektet var

Överskydd vilket leder till vätgasutveckling

Elektriska störningar

Stöld

Skadegörelse

Korrosion på jordningslinan av koppar

Under de två år som försöket pågick sänktes aldrig potentialen till det värde vid vilken risk för vätgasutveckling föreligger.

Vad det gäller risk för elektriska störningar tycks den normala driftströmmen inte ha påverkat skyddet. Det har troligtvis inte varit några elektriska överspänningar, jordfel eller kortslutningar så det går inte att säga hur installationen skulle ha påverkats av dessa. Vissa åtgärder har dock vidtagits vid installationen för att minska risken för påverkan, t ex har anod- och katodkabel tvinnats. Dessutom kopplades katodkabel till stolpen en bit ner i marken. Att placera anoden inne i stolpbenen i stället för mellan stolpbenen eller långt ut från stolpen är också ett sätt att försöka minska eventuell påverkan från elektriska överspänningar. Markens jordresistivitet spelar här också en stor roll.

Solcellerna har inte varit utsatta för varken vandalism eller stöld. Det går att öka skyddet mot stöld ytterligare, dels genom att montera solcellen högre upp i stolpen och dels genom att utforma montaget så att fastsättningen / lossningen kräver specialverktyg. Man kan också konstatera att solcellerna knappt syns i stolpen vilket borde vara en fördel ur stöldskyddssynpunkt.

Det största problemet att lösa är hur man skall undvika att jordningslinan påverkas negativt, vilket gäller samtliga katodiska skydd av kraftledningsstolpar. Detta problem kan teoretiskt åtgärdas på två olika sätt:

Jordlinan tas in i skyddet genom kortslutning till stolpen. Detta är det säkraste sättet, men om jordlinan är långsgående mellan stolparna kommer det troligtvis krävas en betydligt större effekt på solcellen, alternativt att solceller monteras på alla stolpplatser.

En isolerande plastslang träs på jordningslinan de första metrarna från stolpen räknat.

7 Genomförande

Under de tre år som försöket varat utfördes först en projektering följt av installation och sedan utvärdering av skyddsverkan. Slutligen skrevs en tillämpningsinstruktion för rutinmässig användning av metoden.

7.1 Projektering

Projekteringen utfördes i tre steg:

1. Ledning och sträcka som skulle skyddas valdes ut med hjälp av skrivbordsmetoden [4].
2. Varje stolpplats besöktes och provpolarisering utfördes på två stolpplatser.
3. Erforderlig storlek på solcell och anodkonfiguration beräknades enligt kunskaper från tidigare projekt [5].

Resultat från skrivbordsmetoden

Enligt skrivbordsmetoden definieras riskstolpar som en stolpe där risken är stor att den är i ett sådant skick att förnyat korrosionsskydd behövs för att dess ursprungliga hållfasthet inte skall äventyras. Den kraftledning som har valts ut uppfyller detta krav. Den är byggd 1955 och korrosionsskyddet består av rostmån och varmförzinkning. Den delsträcka av ledningen som valts ut går enligt korrosionskorten i korrosiv jord. Tidigare friläggningar på andra stolpar men på samma kraftledning har visat stora och djupa korrosionsangrepp på fundamenten på flera stolpar. Enligt stolptabellen står de flesta av stolparna djupt och har därför stora ytor som är exponerade för den korrosiva jorden.

Besök av stolpplatserna och provpolarisering

16 stolpplatser besöktes och det kunde konstateras att 6 av dessa stolpar stod på berg, betong eller så grunt och torrt att de inte behövde skydd. Resterande tio stolpar stod i myr, lera eller blöt skogsmark. Totalt blev det därför en sträcka omfattande 16 stolpplatser, varav 10 stolpplatser med totalt 20 st stolpben som utrustades med solcells drivet katodiskt skydd. Dimensionen har minskat markant i markbandet på krysstagen för två av dessa stolpar.

Två stolpplatser provpolariserades. Vid provpolarisering simuleras ett skydd med hjälp av ett järnspett som förs ner i marken på det ställe där anoden är tänkt att installeras. Detta spett matas med hjälp av ett 12-voltsbatteri. Minuspolen på batteriet koppas till stolpen varefter dess elektrokemiska potential mäts samt storleken på den ström som spettet matas med.

Resultat från provpolariseringen

På stolpplats 151 (höger stolpben) matades spettet med 600 mA. Potentialen mättes med sond enligt KI:s sond-metod beskriven i rapport [6].

På 25 minuter sjönk potentialen enligt tabell 1. Omräkning till mV mot koppar/kopparsulfatreferens har utförts genom mätning av zinkelektrodens potential mot medhavd koppar/kopparsulfatreferens vilket i detta fall var -1154 mV.

Tabell 1. Potentialmätning vid provpolarisering av stolpplats 151.

Tid (minuter)	Djup (cm)	Potential (mV mot zinkelektrod)	Potential (omräknat till mV mot Cu/CuSO ₄ referens)
0 (före strömmatning)	100	+454	-600
5	100	+348	-806
25	100	+301	-853
0 (före strömmatning)	200	+539	-615
5	200	+220	-934
25	200	+154	-1000

Efter ovanstående mätningar kopplades även jordningslinan av koppar in och potentialen ökade endast 7 mV, vilket visar att kopparlinan kan kopplas in utan att denna drar för mycket ström från skyddet.

Vid provpolarisering av stolpplats 153 blev skillnad i potential före och efter strömmatning mycket liten. Detta beror på att platsen har mycket hög jordresistivitet och således behöver troligtvis inte platsen något förstärkt korrosionsskydd. Det beslöts ändå att installera skyddet på denna stolpplats, då det kan ge en viktig information inför framtida skyddsinstallationer.

Dimensionering av solcell och anod

Den area som är exponerad för jord beräknades utifrån befintliga ritningar på stolparna. Av dessa framgick det att denna area för ett stolpben är ca 15 m², lite beroende på hur djupt stolpen står i förhållande till marknivån. Som ett riktmärke beslöts att beräkna en ström på ca 35 mA/m² och då blir behovet ca 0,5 A per stolpben. För att ha tillräckligt god marginal till skyddet även vid växlande molnighet och vid heltäckande molnighet så skulle solcellen ge denna ström vid ca 40 % ljusinstrålning.

Standard solceller som är inom detta effektområde har ofta en märkeffekt på 20 eller 25 W. Då nackdelarna med de kristallina solcellerna uppmärksammats i tidigare försök så valdes denna typ bort.

Solcellen som valdes ut är en tunnfilmcell av märket Siemens (numera Shell Solar) med typbeteckningen ST 20, 15,6 V och 1,29 A (20 W vid 1000 W/m² ljusinstrålning). Dimensionerna är ca 0,75 x 0,33 m, se även datablad bilaga D.

Denna solcell ger betydande elenergi även vid begränsad solinstrålning.

En monokristallin solcell kan visserligen ge större max effekt men är betydligt känsligare för partiell skugga så kallad cellblockering.

Med parametrarna effektbehov, ej känslig för partiellskugga och kostnaden i förhållande till kvantiteten så föll valet på ovanstående solcell som levererades av Siemens Solar GmbH i Tyskland.

En av de presumtiva leverantörerna krävde en minsta beställningsvolym omfattande 50 st enheter i offerten, för typen tunnfilmcell.

Dimensioneringen av anoden gjordes utifrån markens beskaffenhet inne i stolpbenen. På de stolpplatser som har lera med låg resistivitet behöver inte anoden vara så djup medan det på de platser som har högre resistivitet och porösare jord med mer syre är det nödvändigt med en längre. Dels för att få ner kretsresistansen men också för att få spänningsgradienter på djupet. På de ställen som har en stor mängd stenfyllnad inne i stolpbenet är det viktigt att se till så att anoden får kontakt med jorden omkring ramstängerna eventuellt genom påfyllnad av jord.

7.2 Teknisk utformning

Solcellerna placerades på en av ramstängerna i varje stolpben, dvs två solceller på varje stopplats, se fig 8.



Fig.8. En solcell placerades i varje stolpben.

Inuti stolpbenen placerades de inerta anoderna i marken. Detta är den konfiguration som fungerade säkrast i tidigare försök. Denna konfiguration anses dessutom bäst ur störningssynpunkt då anoden är placerad inne i stolpbenet och inga kablar är nergrävda utanför stolpbenen. Solcellen monterades ca 10 meter upp i stolpen, dels för att minska risken för stöld och dels för att erhålla så lång tid som möjligt då solcellen är aktiv (ovan för skuggande träd), se fig 9.



Figur 9. Solcellen monteras med hjälp av kran.

Kopplingslådor typ KS 1423 i glasfiber från Rittal där låsinsatsen byttes ut till trekantsnyckel för minskad risk för åverkan och stöld, monterades på ett diagonalt vinkeljärn ca 1,5 – 2 m ovan mark vid varje stolpben, se fig 10.



Figur 10. En kopplingslåda placerades i stolpen ovan mark.

Kopplingslådornas dörrar försågs med varningsskylt för elektrisk spänning. Dessa kopplingslådor (mätboxar) syftade till att få tillförlitlig mätning av dels ström och spänning från solcellen dels av skyddspotentialer på stolpen och provplåtar samt en lämplig placering av logger. En stationär referenselektrod (Cu/CuSO_4) placerades på ca en meters djup mellan ett stolpben:s två ramstänger, vid varje stolpplats och kabel drogs in till mätboxens mätplint, se bilaga E.

Solcellsval, monteringsvinkel, effekt, åskskydd, placering i höjddled, väderstrecksinriktning och stativutformning (så stöldsdyddat som möjligt) optimerades.

Före utplacering mättes stolparnas korrosionspotentialer upp, se bilaga A6. På sträckan finns också korrosionskort [2] bevarade som anger resistivitet, pH och jordart på varje stolpplats.

På ett av stolpbenen vid samtliga stolpplatser nersattes provplåtar av stål på ett djup av ca 0,5 m under marknivå. Dessa var förbehandlade genom slipning, avfettning och invägning. På varje stolpplats installerades två plåtar i kontakt med stolpen och en utan kontakt med stolpen (fritt exponerad), se fig 11.



Fig 11. Provplåtar och stationär referens nedgrävdes vid fundamentet.

Provplåtarna i kontakt med stolpen skall erhålla samma skydd som själva stolpen. Genom att jämföra viktsförlusten på de provplåtar som har varit i kontakt med stolpen och de som inte varit i kontakt med stolpen är syftet att man ska kunna se vilket skydd stolpen har fått. Tidigare undersökning [1] visade dock att de provplåtar som varit i kontakt med stolpen korroderade mer än de som inte varit i kontakt med stolpen. Egentligen är den bästa metoden att först ha provplåtar i kontakt med stolpen under ett år för att se den verkliga korrosionshastigheten på stolpen för att därefter installera skyddet och provplåtar enligt ovan. Det fanns dock ingen tid för detta förfarande i projektet.

Tidigare undersökning [7] har visat att jordningslinan påverkas negativt ur korrosionssynpunkt vid installation av katodiskt skydd. Detta beror på att jordningslinan inte har direkt kontakt med stolpen (och skyddet) då normalt ett gnistgap är inkopplat emellan. Denna negativa effekt kan lösas genom att koppla ihop jordningslinan med stolpen (och därmed med skyddet). Eftersom jordningslinan oftast är av koppar kommer då stolpen att utsättas för galvanisk korrosion under den tid då skyddet inte fungerar (under dygnets mörka timmar och mörkmolniga dagar). Därför hade vi som målsättning i detta försök att installera dioder på tre stolpplatser. Dessa dioder skall ”sluta kretsen” mellan kopparlina och stolpe när solcellen matar ström och den ska således ”bryta kretsen” när solcellen inte är aktiv. Tyvärr gick det endast att installera dioder på två stolpplatser (151, 165) p g a att det var hög växelspanningsnivå ($5,6 V_{AC}$) över gnistgapet vid stolpplats 158. Därmed sattes diodens funktion för likspänning ur spel. Växelspanningen var så kraftig att den kunde driva $3,8 A_{AC}$ vid kortslutning över gnistgapet.

För att jämföra resultatet mellan stolpplatser med diod och stolpplatser utan diod har sex platser försatts med kopparprovplåtar, två på varje stolplats. En av dessa har haft kontakt med kopparlinan och en har inte haft kontakt. Även kopparprovplåtarnas kablar kopplades till mätboxen. Provplåtarna avfettades och vägdes före installationen. Under försökets gång har även potentialerna mätts upp på kopparplåtarna.

För att kunna studera skyddets effektivitet över dygnet och vid olika årstider har loggning utförts kontinuerligt under fyra tidsperioder omfattande ca en månad i taget och på fyra stolpplatser vid varje tillfälle, se även bilaga A. Vid loggningen har endast ON-potentialer kunnat mätas upp. Ett försök med att mäta även OFF-potentialer under loggningsperioderna misslyckades då loggningsintervallet måste vara mycket kort i princip oftare än varje sekund för att det skall gå att utläsa något. Loggrarna som vi använde hade inte denna funktionalitet inbyggd. En uppmätning av OFF-potentialen med ett digitalt batteridrivet minnesoscilloskop gjordes dock på stolpe 114 den 9:e oktober 2002. Denna visar att OFF-potentialen är $-1,08\text{ V}$ ca 130 mV under ON-potentialen ($-1,21\text{ V}$), se även diagram 1 bilaga A5. Observera att växelspänningen endast är ca $60\text{ mV}_{\text{p-p}}$ dvs ca 21 mV_{AC} (rms). Vid ett annat tillfälle den 5:e oktober 2000 (dagen efter installationen) gjordes också en registrering av OFF-potentialen, denna gången med en skrivare och vid detta tillfälle ändrades potentialen med ca 200 mV på $0,1\text{ sek}$ ner till $-1,05\text{ V}$. Detta gjordes på stolpe 165.

7.3 Utrustning för kontroll av skyddsverkan

Undersökning av skyddsverkan har utförts på två sätt:

1. Mätning av skyddspotentialen.
2. Exponering av provplåtar.

Mätning av skyddspotentialen har i sin tur skett på två sätt, kontinuerlig loggning under en månad i taget och momentanmätning av potentialer.

8 Resultat

8.1 Resultat från mätningar

Tabell 2 och 3 visar vilka mättillfällen och perioder som mätningar utförts samt vad som mätts.

Kontinuerlig mätning med loggning har utförts mot stationär referens. Fyra stolpplatser loggades, tre loggar placerades varje gång på samma stolpplatser medan den fjärde loggern placerades på olika stolpplatser.

Tabell 2. Mätschema för kontinuerlig mätningar av potentialen.

Årstid	Typ av mätning	Notering/bilaga	Utfört
Vår-2001	Loggning av 4 stolpar (alltid 166,165 och 161)	Bilaga A.1	2001-02-16 – 2001-04-17
Sommar-2001	Loggning av 4 stolpar (alltid 166,165 och 161)	Bilaga A.2	2001-06-19 – 2001-08-31
Vinter-2001/2002	Loggning av 4 stolpar (alltid 166,165 och 161)	Bilaga A.3	2001-12-20 – 2002-01-30
Höst-2002	Loggning av 4 stolpar (alltid 166,165 och 161)	Bilaga A.4	2002-09-12 – 2002-10-08
Höst-2002	Besiktning/mätning på solcellerna	Bilaga A.5	2002-10-08 – 2002-10-09

Momentanmätning av skyddspotentialen har skett två gånger, en på sommaren-01 och en på våren-02 där mätning har skett på varje ramstång mot medhavd, portabel referens [6]. Dessutom mättes korrosionspotentialen på samma sätt före installationen.

Skyddspotentialen har mätts mot stationär referens vid flera tillfällen varav tre redovisas i rapporten. Dessutom mättes både ON- och OFF-potentialerna strax efter installationen, dessa värden redovisas också.

Tabell 3. Momentanmätning av potentialer.

Mättillfälle	Mätning		Bilaga
	Mot stationär referens	Mot medhavd referens	
2000-10-02 – 2000-10-04		Korrosionspotential före installation vid varje ramstång	Bilaga A.6
2000-10-02 – 2000-10-04		ON- och OFF-potentialer precis efter driftsättning	Bilaga A.6
2001-06-19 – 2001-06-29		ON-potential vid varje ramstång	Bilaga A.6
2002-05-21 – 2002-05-22		ON-potential vid varje ramstång	Bilaga A.6
2001-06-19 – 2001-06-29	ON-potential		Bilaga A.7
2002-01-30	ON-potential		Bilaga A.7
2002-05-21 – 2002-05-22	ON-potential		Bilaga A.7

Vid momentanmätning av potentialen på varje plats har portabel referens av koppar/kopparsulfattyp använts. Vid övriga mätningar har den stationära referens som installerats på ca 1 meters djup använts.

Resultatet från mätningarna visar att skyddet fungerar under dygnets ljusa timmar. Mulet väder ger naturligtvis sämre skydd än när solen skiner. Skyddet fungerar även på vintern även om antalet timmar självklart blir färre under den mörka årstiden.

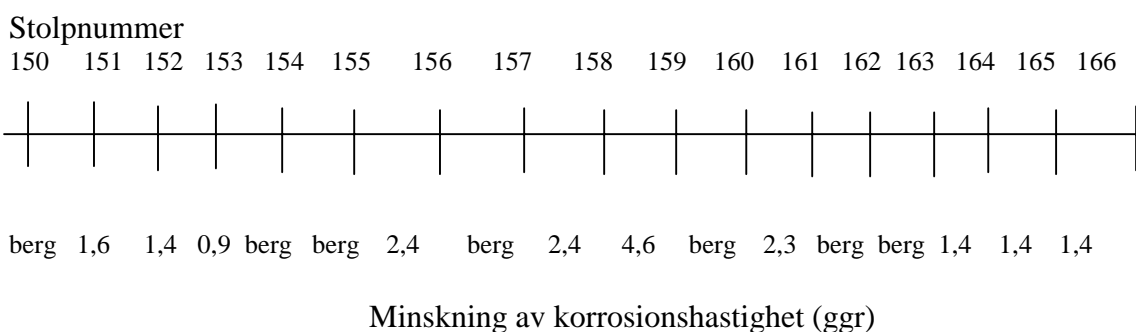
8.2 Resultat från exponering av provplåtar

Mätningar av provplåtarnas potentialer utfördes ett flertal gånger. Dessa mätningar visade att provplåtarna i kontakt med stolpen även hade kontakt med korrosionsskyddet, medan provplåten utan kontakt med stolpen hade en potential som överensstämde ganska väl med stolpens naturliga korrosionspotential.

Plåtar av järn

Plåtarna var 2 mm tjocka och storleken var 10x10 cm. Nummermärkning gjordes dels med hålmärkning i plåten och dels på kabeln som förband plåt med mätplint. På kabeln märktes båda ändar med samma nummer. Plåtarna avfettades, torkades och vägdes. Därefter lades de i väl förslutna plastpåsar med torkmedel. Påsarna förvarades sedan varmt och torrt till utsättningen. Efter två år togs plåtarna upp, tvättades av och betades. Därefter vägdes de och viktförlusten beräknades. Dessutom beräknades medelavfrätningen. Resultatet, som ses i bilaga B1, visar att korrosionshastigheten minskar med upp till 4,6 gånger på plåtar som varit i kontakt med skyddet i förhållande till plåtar utan kontakt med skyddet. Resultatet visar också att de stolpar som är

placerade i mitten av sträckan uppvisar bästa resultatet (störst minskning av korrosionshastighet) se figur 12.



Figur 12 . Minskning av korrosionshastigheten är störst på de stolpar som står i mitten.

Kopparplåtar

Plåtarna var 1 mm tjocka och storleken var 10x10 cm. Nummermärkning gjordes dels med hålmärkning i plåten och dels på kabeln som förband plåt med mätplint. På kabeln märktes båda ändar med samma nummer. Plåtarna avfettades, torkades och vägdes. Därefter lades de i en väl försluten plastpåse med torkmedel. Påsen förvarades sedan varmt och torrt till utsättningen. Efter två år togs plåtarna upp, tvättades av och betades. Därefter vägdes de och vikt förlusten beräknades. Dessutom beräknades medelavfrätningen.

Tre stolpplatser har fått högre korrosionshastighet på den plåt som är i kontakt med kopparlinan, vilket är väntat. En stolpplatz har lika korrosionshastigheten oberoende på om plåten har kontakt eller ej med kopparlinan. Två stolpplatser har dioder monterad, se kapitel 6.2. I ena fallet har korrosionshastigheten då ökat men i det andra fallet har den minskat.

Korrosionshastigheterna bedöms dock överlag vara låga och vi anser därför inte att man behöver ta hänsyn till korrosion på jordningslina av koppar och således behöver man inte vidta några åtgärder för att hindra denna korrosion.

8.3 Diskussion av resultatet

Försöken har visat att fundament kan skyddas mot korrosion med hjälp av solcellsmatat katodiskt skydd. Skyddet blir inte fullständigt men en betydande förlängning av livslängden kan påräknas. För fullständigt skydd krävs att batterier installeras.

I det föregående projektet uppmärksammades att stolpfundamenten inte bara är utsatta för naturlig jordkorrosion utan även andra faktorer inverkar på korrosionshastigheten.

Således kan ett fundament offra sig mot andra längre bort liggande fundament pga luftningsceller. Denna effekt var så kraftig att de skyddade plåtarna var mer angripna än de oskyddade, trots att potentialmätningarna visade på god skyddseffekt då solcellerna gav ström. För att minimera denna effekt installeras i detta projekt solceller på en längre sträcka. Som framgår av figur 10 erhöles också det bästa skyddet på stolpplatserna placerade i mitten av den skyddade sträckan. Detta gäller även om man hoppar över bergsstolpar/ stolpar som står mycket torrt (lämnas utan skydd).

Det kan inte heller uteslutas att de till skyddet anslutna provplåtarna, i det föregående försöket var utsatta för växelströmskorrosion. Mätningar har nämligen visat att fundamenten kan ha en icke försumbar växelströmspotential. Det samma gäller jordningslinorna. I bilaga F har beräkningar av förväntad växelströmskorrosion genomförts. De oskyddade plåtarna har inte varit anslutna till fundamenten och därför inte exponerats för någon växelströmskorrosion. Om vi adderar de beräknade värdena för växelströmskorrosion stiger skyddseffekten ytterligare, se samma bilaga. I genomsnitt har skyddet halverat korrosionshastigheten vilket innebär en fördubbling av livslängden.

Eftersom jordningslinor av koppar är galvaniskt skilda från fundamenten via gnistgap finns en risk för att dessa läckströmspåverkas av det katodiska skyddet, så kallad sekundärpåverkan. Med en anodplacering inuti stolpbenet minimeras dock påverkan. Betydligt större påverkan är att förvänta om skyddsströmmen skickas ut från en anod placerad utanför stolpbenet. Om jordningslinan kortsluts till stolpen elimineras risken för påverkan på linan men samtidigt angrips fundamentet av galvanisk korrosion under de perioder då solcellen inte ger någon ström. För att kringgå detta installerades en diod mellan lina och stolpe, på två platser. Dessa släpper igenom likström då solcellen ger ström men blockerar ström då solcellen inte ger ström. På den ena stolpplatsen (165) hade dioden avsedd verkan dock inte på den andra (151). Tas dock hänsyn till växelströmskorrosionen, se bilaga F, blir resultatet att båda dioderna minskar läckströmspåverkan. Sammanfattningsvis kan sägas att läckströmspåverkan på jordlinorna är försumbar med den använda anodplaceringen.

9 Utvärdering av solcellens funktion

Solceller använder som bekant ljus för att producera elektrisk ström, tyvärr är det endast ca 10 – 15 % av den instrålade ljuseffekten som omvandlas till eleffekt.

Den solcell som valdes ut i detta projekt är av typen tunnfilmscell. Solcellespanelen är tillverkad enligt en ”mono lithic structure of series connected Copper Indium Diselenide” (CIS) metod och kan generera en max effekt av 20 W vid 15,6 V / 1,29 A med en kortslutningsström på 1,54 A, allt vid en instrålad ljuseffekt på 1000 W/m².

Tillverkaren ger en effektgaranti på 10 år och beräknar en livslängd på 30 år.

Vid laddning av batterier förses solceller normalt med en blockeringsdiod för att inte batteriet skall urladdas via solcellen då den befinner sig i mörker. Nu är det så att denna urladdningsström är starkt beroende på spänningsnivån i det drivande batteriet vid mörkerperioden.

För ett katodiskt skydd är drivspänningen för det ekvivalenta ”batteriet” (korrosionen, anod, katod och elektrolyt) under 1 V vid mörkerperioden och då blir urladdningsströmmen genom solcellen väldigt låg < 100 µA och behovet av blockeringsdiod försumbar.

Solcellens funktion har visat sig uppfylla de förväntade kraven på ett katodiskt skydd med påtryckt ström så här långt. Under dagtid då solcellen är belyst med dagsljus fungerar den på ett tillfredställande sätt. Det har visat sig att även vid ljus molnighet ger solcellen ett begränsat skydd, motsvarande 100 – 200 mV potentialsänkning och det är endast vid extremt mörk molnighet som solcellen inte ger något skydd alls.

En annan observation som gjorts vid loggningarna är att en viss polarisation kvarstår även under början på mörker perioden efter någon/några dagars soligt väder.

Den totala effekten som är nödvändig för det katodiska skyddet är ganska begränsad ca 2 – 5 W för 10 m² stål. För att täcka in detta med en solcell som har begränsad effektutgång, speciellt vid icke direkt solsken behövs det en rejäl marginal vid valet av effektstorlek. Det skall också beaktas att det endast är 50 % av den totala årstiden som är dagsljus period.

En 20 W solcell ger i genomsnitt en energi på ett år motsvarande ca 48 Ah, fördelat på dagsljusperioden dvs 50 % av 8.760 h ger detta en snitt ström på ca 11 mA.

Vid mätningar på solcellen visar det sig att den ger ca 50 mA även vid grå molnighet på dagtid och ca 200 mA vid ljusare molnighet. För att vid sol ge märkt effekt. Även om solcellen vid vissa tillfällen kan ge mer ström är det ibland kretsresistansen mellan anod och katod (stålet) som är så höghögig att strömmen begränsas på grund av detta då maximal spänning uppnåtts. Det rekommenderas att få ner kretsresistansen under 1000 Ω men inte under 10 Ω. Anodens längd och utformning samt markens beskaffenhet runt anoden är helt avgörande för den totala kretsresistansen.

Solcellens tålighet mot överspänningar är troligen begränsad, datauppgifter från tillverkarna har ej gått att få. För att minimera överspänningspåverkan har flera åtgärder vidtagits. Det bedömdes dock inte som nödvändigt att koppla in något separat överspänningsskydd direkt över solcellen. Vidare kan det också konstateras att efter två åskrika somrar i området är alla solcellerna (23 st.) intakta. Vid test med transient överspänningar enligt norm vid några kV har solcellen ej uppvisat någon skada.

Besiktning

Vid besiktningen som utfördes efter två års drift var alla 21 solceller som köptes in i detta projekt intakta. Det kunde inte noteras vare sig fågelspillning eller några stöldförsök på solcellerna. Även alla installerade mätboxar är intakta och någon åverkan har även här inte gått att notera. På ett stolpben såg det dock ut som om någon dragit i den partvinnade kabeln uppe från solcellen in till mätboxen. Någon skada eller funktionsfel hade dock inte åstadkommits.

Vid besiktningen gjordes momentanmätningar av solcellens spänning och ström samt potentialen på stolpen (stålet). Tillgänglig kortslutningsström vid det aktuella ljusinflödet kontrollerades också, se bilaga A5.

10 Ekonomi

Förutsättningarna för den ekonomiska kalkylen är att solcellsdrivet katodiskt korrosionsskydd monteras på en kraftledning med sk portalstolpar på en ledningssträcka omfattande totalt 45 st stolpplatser och där 30 st av dessa har behov av korrosionsskydd. Kostnaderna har beräknats från de faktiska kostnader som projektet har haft, men har reducerats med de kostnader som berör installationen av provplåtarna. Timpriserna har justerats med hänsyn till de kategorier som bör utföra det då det skall installeras rutinmässigt. I större skala uppskattas kostnaderna för material också att minska.

Vid den ekonomiska kalkylen ingår följande:

1. Kostnad för projektering
2. Kostnad för utrustning (anodmaterial, kablar, solcell, fästanordning)
3. Kostnad för installation (grävning, hopmontering)
4. Efterkontroll

Nedan följer en beskrivning av varje moment ovan.

1. I kostnad för projektering ingår granskning av kartmaterial, korrosionskort, ritningar mm, beräkning av anodkonfiguration, kontakt med leverantörer och eventuell provpolarisering. Kostnad för projektering är beroende på hur många skydd som skall installeras vid samma tillfälle. Vi antar att 30 stolpplatser skall förses med skydd. Tiden för projektering inklusive provpolarisering/ besök på varje stolpplats har då beräknats till ca tre arbetsveckor á 24.000:-.
2. I kostnad för utrustning ingår solcell, anod, anodrör, kablar, fästanordning, fyllmaterial och kopplingsdosa. Vi räknar inte med kostnad för eventuell fjärrövervakning. Kontrollen antas ske vid ordinarie besiktning.
3. I kostnad för installation ingår grävmaskin med korglift samt installation. Väl på plats tar fullständig installation av en solcell ca 30 minuter. En stolpe med en solcell i vardera stolpbenet tar då ca 1 timme. Med prefabricerade kablar, förmonterade fästen på solcellspanelen och en viss upparbetad erfarenhet kan tiden troligen reduceras ytterligare.
4. Efter ca en månad bör skyddseffekten mätas på varje stolpplats. Trettio stolpar mäts på ca fyra dagar.

Tabell 4 visar uppskattade kostnader för ovanstående utgående från utfört försök och antagandet att 30 stolpar skall skyddas. Kostnaderna har beräknats från de faktiska kostnader som projektet har haft.

Vi har räknat med timpris 600 kr/h. En montör ligger på 525 kr/h medan konsult hjälp ligger på mer än 600 kr/h. Därför tog vi 600 kr/h i medeltal. Grävare kostar enligt uppgift 500 kr/h inkl gubbe. Detta tror vi är något lågt så vi säger 800 kr/h för att täcka in storstadsområden, dvs $800 + 600 = 1.400$ kr/h för två personer vid installation.

Tabell 4. Uppskattade kostnader för installation av solceller

Kostnadsslag	Totalkostnad	Kostnad per stolpplats
Projektering	72.000:-	2.400:-
Material	310.000:-	10.300:-
Installation	112.000:-	3.800:-
Kontrollmätning	24.000:-	800:-
TOTALT	518.000:-	17.300:-

Skyddet beräknas ha en livslängd på 30 år.

I den nyss avslutade fältprovningen ingick 16 stolpar, varav endast tio behövde skyddas. Detta är troligen en realistisk situation, ca 50% kan hoppas över. I så fall skyddas 45 stolpar med hjälp av de trettio solcellsskydden. Eventuellt kan skyddet kompletteras med batteri för att ytterligare höja effekten av skyddet.

Kostnaden kan jämföras med kostnad för anodbäddinstallation som beräknas till ca 300 000:- [7] där sträckan som skyddas blir ca 45 stolpar inklusive de stolpar som inte behöver skyddas.

Detta innebär att ekonomiskt har solcellstekniken svårt att konkurrera när varje stolpplats skall ha solcellsmatat katodiskt korrosionsskydd och om det går att skydda stolparna med anodbädd. Så är dock inte alltid fallet, då anodbädd kräver speciella förhållanden där ett så kallat riskområde bestäms. Inom detta riskområde får inte främmande konstruktioner finnas (elkablar, telekablar, jordförlagda rör osv). I de fall där riskområdet inte kan accepteras är solcellsmatat katodiskt korrosionsskydd av varje stolpplats den mest fördelaktiga metoden.

11 Miljö

Installation av solcellsmatat katodiskt korrosionsskydd bidrar positivt till miljön eftersom en förlängning av stolpens livslängd är det bästa ur miljösynpunkt. Det läcker inte ut några miljöstörande ämnen i naturen från skyddet. Det till och med motverkar läckage av kadmium eftersom varmförzinkningen i jorden bibehålls på stolpen, zinken i varmförzinkningen innehåller troligtvis kadmium som läcker ut när zinken korroderar, vilket har undersökts och redovisats i rapport [8].

Det finns solceller som innehåller miljöstörande ämnen. Vad som skall klassas som miljöstörande ämnen är inte entydigt. Det beror på ur vilket perspektiv man tittar. Är ämnena som ingår i solceller biprodukterna vid annan brytning av ämnen eller bryter man ämnen endast för tillverkning av solceller. Denna frågeställning kommer att bli viktigare och viktigare i takt med ökat användande av solceller. Exempel på miljöstörande ämnen som kan ingå i solceller är: kadmium, koppar, indium och selen.

12 Tillämpningsinstruktion

Tillämpningsinstruktionen är tänkt att vara en hjälp vid konstruktion, installation och drift av solcellsdrivna katodiska korrosionsskydd på kraftledningsstolpar. Man kan också se den som en checklista för de frågeställningar som bör beaktas. Instruktionen behandlar solceller, strömbehov, placering, fäste, installation, drift och underhåll. Den framgår i sin helhet av bilaga C.

13 Komplettering av solcell på stolpe från tidigare försök

Två stolpplatser (114 och 117) har i ett tidigare försök försetts med solceller. Det kunde då konstateras (1) att solcellen på den ena stolpplatsen (114) inte gav tillräckligt med ström för att skydda de båda stolpbenen, detta då det endast var en solcell och en anod som skulle skydda hela stolpplatsen. Solcellen var på 25 W och stolpplatsen placerad i lågresistiv lera. På denna stolpplats installerades nu en solcell till av samma typ som installerades på de 20 stolpbenen i detta projekt med samma typ av fäste som användes i detta projekt. Därmed ökades effekten till totalt 45 W med en kristallin cell på 25 W och en tunnfilmscell på 20 W.

Den ”nya” solcellen inkopplades parallellt med den befintliga solcellen via en diod (överspänningsskyddad) eftersom solcellerna har olika karakteristik vid samma ljusinstrålnings effekt. Monteringsvinkeln var dessutom olika för de två solcellerna. Det ingick dock inte i detta projekt att utvärdera denna installation och därför har endast sporadiska mätningar utförts på denna stolpplats. En loggning utfördes dock 2001-09-16 till 2001-10-24 och en 2002-10-09 till 2002-11-06. Resultatet pekar på att båda stolpbenen nu skyddas på ett tillräckligt sätt under dagtid. Även vid en momentanmätning sommaren 2001-06-29 var det nu en ON-potential på ca $-1,1$ V vilket även det indikerar ett fullgott skydd.

14 Kompletterande utveckling

Genom att installera batteri som tål överspänningar och andra miljöparametrar som till exempel temperaturvariationer, kan skyddsverkan förlängas över dygnet till en låg kostnad. Det krävs dock en utveckling på batterisidan så att det blir en kommersiellt tillgänglig produkt

Skyddsverkan med solcellsmatat katodiskt korrosionsskydd är sämst på vintern. Det finns dock inga publicerade undersökningar utförda som kan ge ett entydigt svar på vilken årstid som har den högsta korrosionshastigheten på varmförzinkat stål. Är korrosionen störst på vintern eller sommaren? Det skulle vara mycket intressant att utreda detta.

Skulle korrosionshastigheten vara minimal på vintern blir solcellsmatat katodiskt korrosionsskydd än mer intressant.

Det skulle vara utvecklande att installera solcellsmatat katodiskt korrosionsskydd på en anläggning med anodbädd, där flera stolpar skyddas från samma anod. Just nu planeras två sådana anläggningar i Sverige. Det skulle vara värdefullt om åtminstone den ena kunde förses med solcellsmatad ström. Detta kommer att tas upp med ägaren.

15 Diskussion och slutsatser

Liksom den tidigare undersökningen [1] visar även denna att det är fullt möjligt att skydda kraftledningsstolpars underjordsdelar med hjälp av solcellsmatat katodiskt korrosionsskydd.

Problemet är att metoden har visat sig vara något dyrare. Det är framför allt kostnad för material som är högre. Det bör dock gå att minska kostnaderna betydligt om större kvantiteter beställs. Vid beräkning av projekteringskostnaden har vi antagit att hela projekteringen läggs ut på entreprenad.

När flera stolpar längs en kraftledning skall skyddas är det mest ekonomiskt att installera skydd lokalt på de stolpplatser som behöver skydd och lämna övriga utan skydd. Eftersom det krävs liten effekt för skydd passar solcellsmatning utmärkt. Metoden har visat sig vara enkel att installera, robust och hållbar. De komponenter som ingår ska ha lång livslängd. Både anoden och solcellen beräknas ha ca 30 års livslängd. Det är också enkelt att vid vanlig inspektion mäta skyddsverkan antingen genom strömmätning eller potentialmätning. Valet är att installera skyddet i så god tid att det inte behövs batterier för att även täcka in skyddsverkan under mörkertiden då solcellen inte avger ström. Batterierna krävs ju, om man inte kan tillåta att stålet korroderar mer. Man kan också tänka sig att riskklassificera stolparna, så att de viktigaste, nära vägar, järnvägar, korsningar, ställverk, skyddas med solceller och batteri under mörkertiden, medan övriga får klara sig med den kortare skyddstiden.

Enligt denna undersökning erhålls bäst skydd tre stolpar från ytterkanten, dvs den fjärde stolpen som skyddas får bäst skydd. Detta bör beaktas vid projekteringen så att enstaka stolpar ej skyddas med solcellsmatat katodiskt korrosionsskydd. Först när flera i rad skall skyddas är det aktuellt att använda denna form av skydd.

När en serie av stolpar skall skyddas går det bra att hoppa över flera stolpplatser då de står i mycket högresistiv jord och som då inte anses behöva skydd.

Vid mätning av skyddsverkan bör det vara bra väder (soligt eller växlande molnighet). Under en mörkmulen dag har man svårt att mäta solcellens fulla funktion. Detta bör man beakta vid underhållsplaneringen. Även en klar vinterdag går det att mäta om skyddet är i funktion. En mulen vinterdag ger dock inte tillräcklig ström från solcellen för att mätning skall kunna ske tillfredsställande.

Korrosionshastigheten på kopparlinan är så låg att man inte behöver installera dioder för att skydda denna från läckströmskorrosion.

16 Referenser

- [1] Forssander, M; Johansson, C; ”Solcellsmatat katodiskt korrosionsskydd av kraftledningsstolpar”, Elforskrapport 99:16, Stockholm, Augusti 1999.
- [2] Forssander, M; ”Korrosion i jord av kraftledningsstolpar och –stag. Identifiering av riskstolpar. Skrivbordsmetoden”, Elforskrapport 99:43, Stockholm, December 1999.
- [3] Wranglén, G; ”An introduction to corrosion and protection of metals”, KTH, Stockholm, 1970.
- [4] Mattsson, E; ”Elektrokemi och korrosionslära”, Bulletin nr 100, Korrosionsinstitutet, Stockholm, 1992.
- [5] Sandberg, B; ”Skyddsanoders utformning vid katodskydd av kraftledningsstolpar”, Rapport 96-05-08, Korrosionsgruppen AB, Stockholm, Maj 1996.
- [6] Forssander, M; ”Korrosion i jord av kraftledningsstolpar och –stag. Identifiering av riskstolpar. Fältnätmetoder” Elforskrapport 99:43 Del 3, Stockholm, Februari 2000.
- [7] Forssander, M; Tuveson-Carlström, L; ”Korrosion i jord av kraftledningsstolpar och –stag. Katodiskt skydd med påtryckt ström och fjärranodbädd för skydd av kraftledningsstolpar – slutrapport”, Elforsk rapport 99:43 del 11, Stockholm, februari 2000.
- [8] Forssander, M; ”Offeranoder mot korrosion i jord. Miljökonsekvensutredning”; Elforsk rapport 00:29; Stockholm, oktober 2000.

Bilagor

A Mätresultat

B Resultat från exponering av provplåtar

C Tillämpningsinstruktion

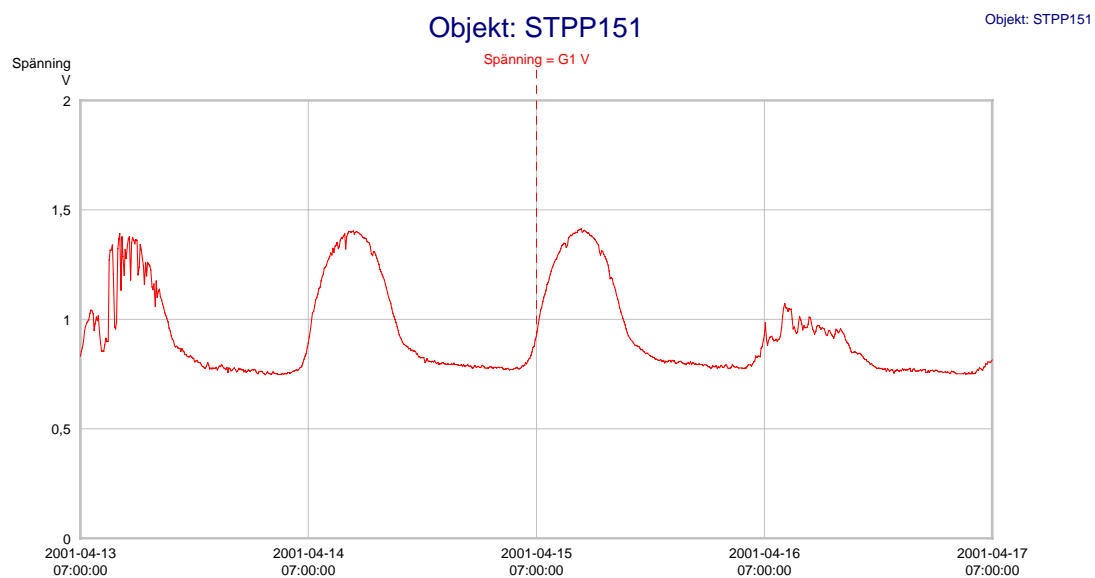
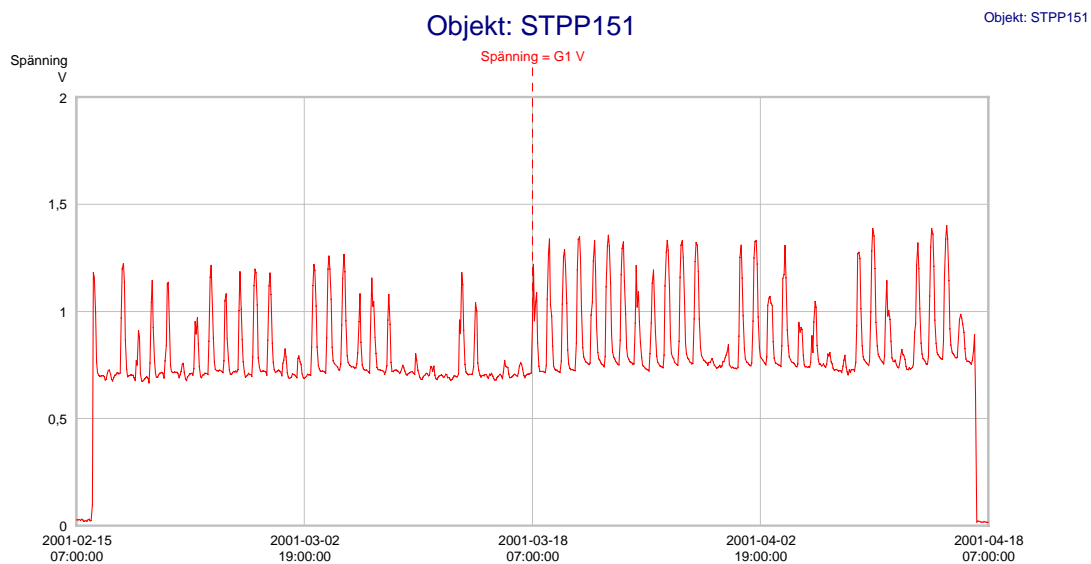
D Solcellsdatablad

E Figur över installation

F Beräkning av växelströmskorrosion på provplåtar

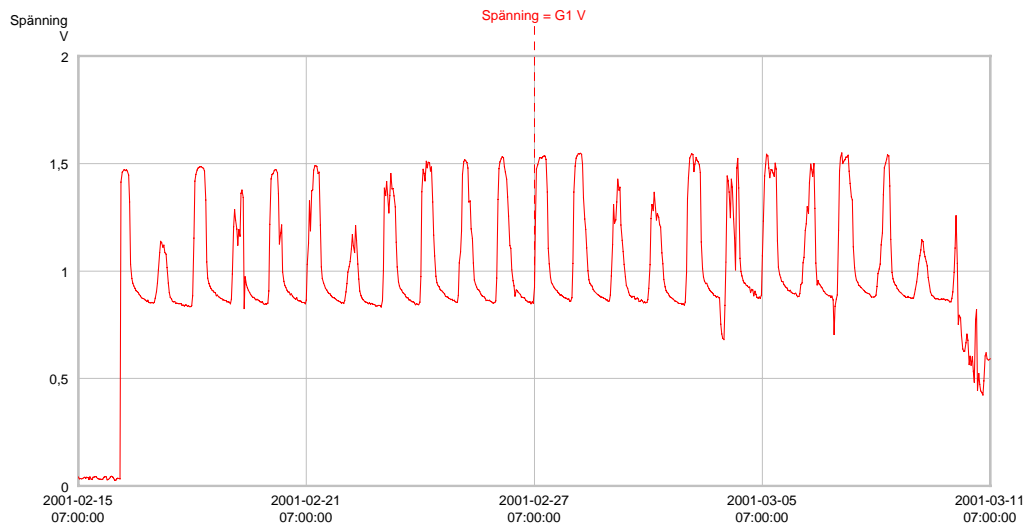
A Mätresultat

A.1 Mätresultat loggning våren 2001.



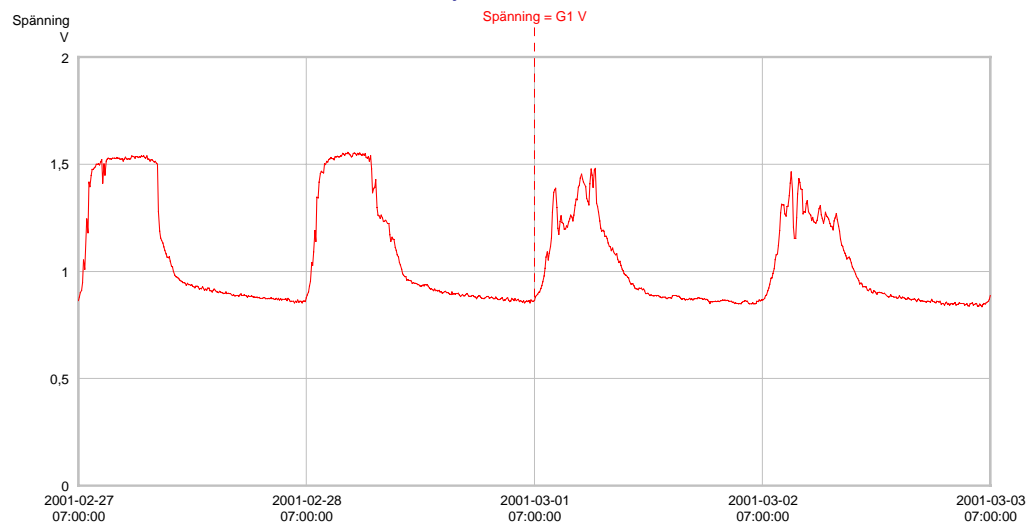
Objekt: STPP161M

Objekt: STPP161M



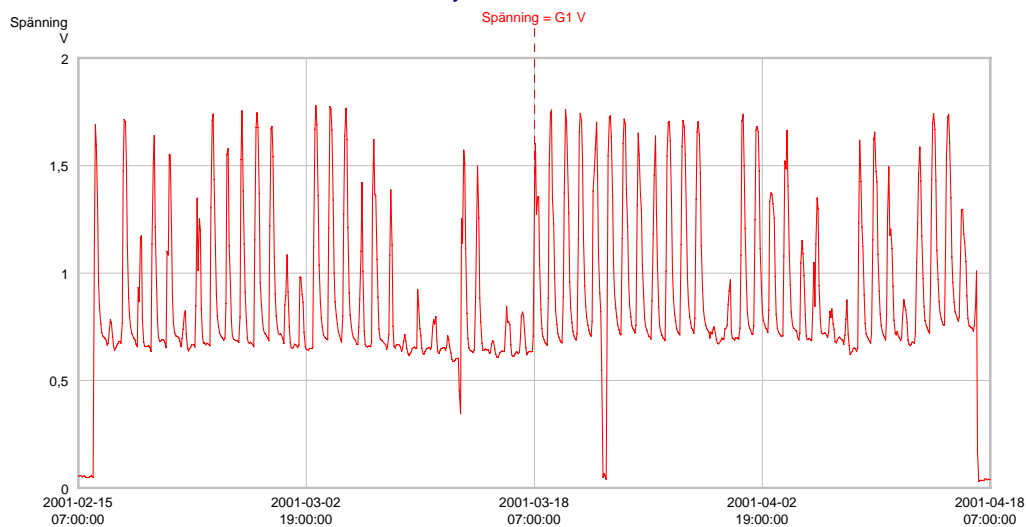
Objekt: STPP161M

Objekt: STPP161M



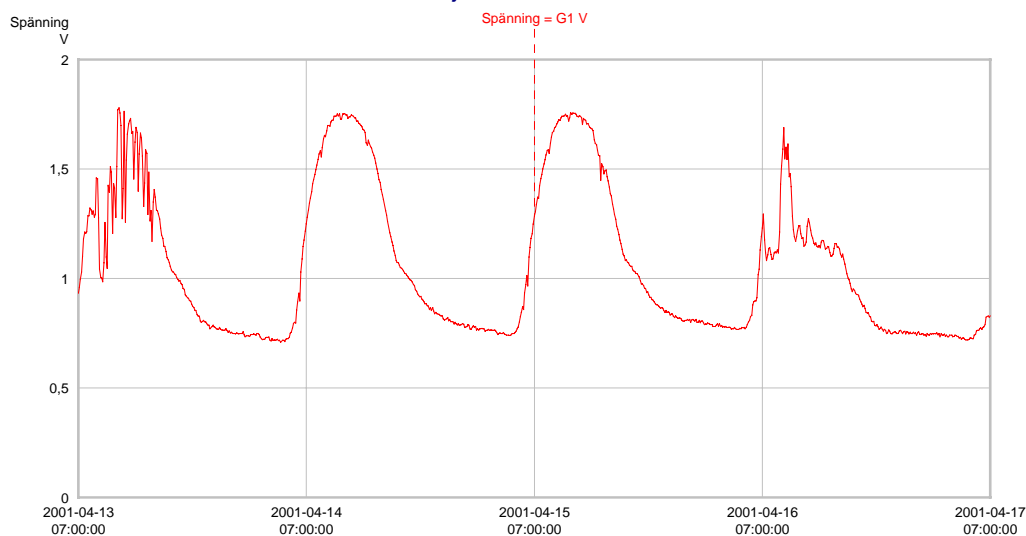
Objekt: STPP165M

Objekt: STPP165M



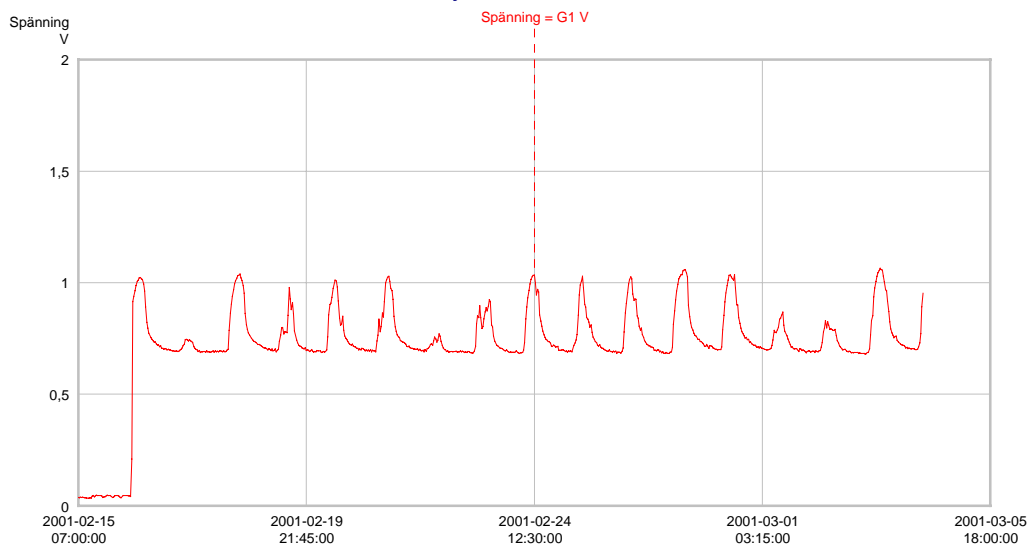
Objekt: STPP165M

Objekt: STPP165M



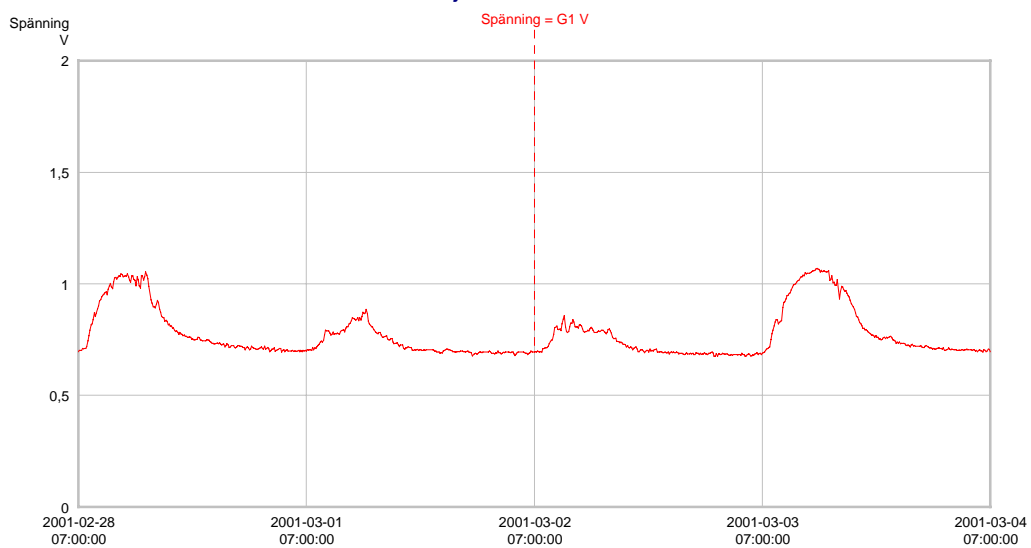
Objekt: STPP166X

Objekt: STPP166X

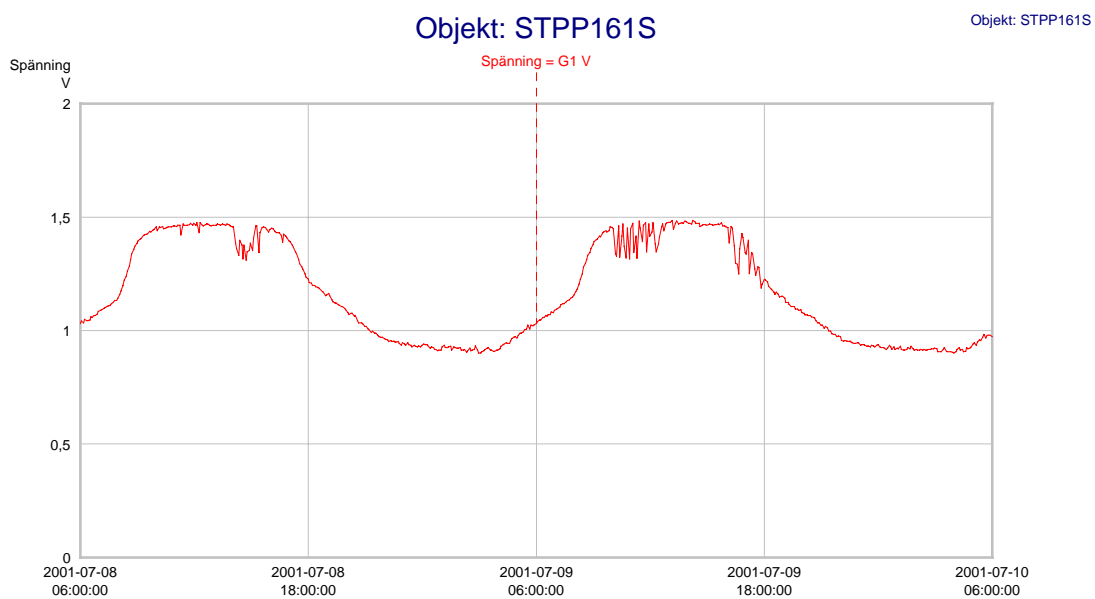
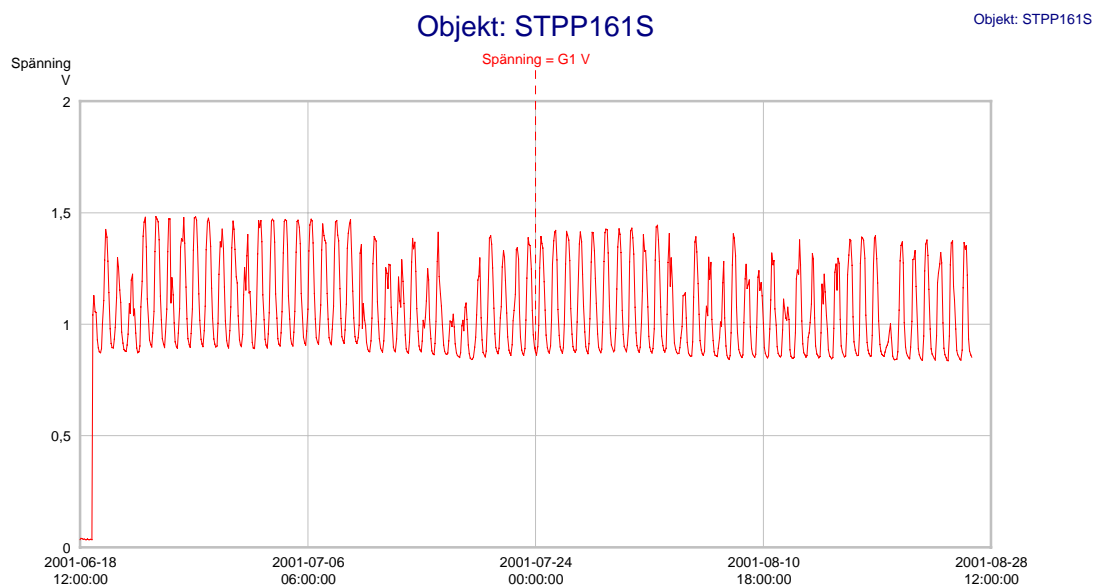


Objekt: STPP166X

Objekt: STPP166X

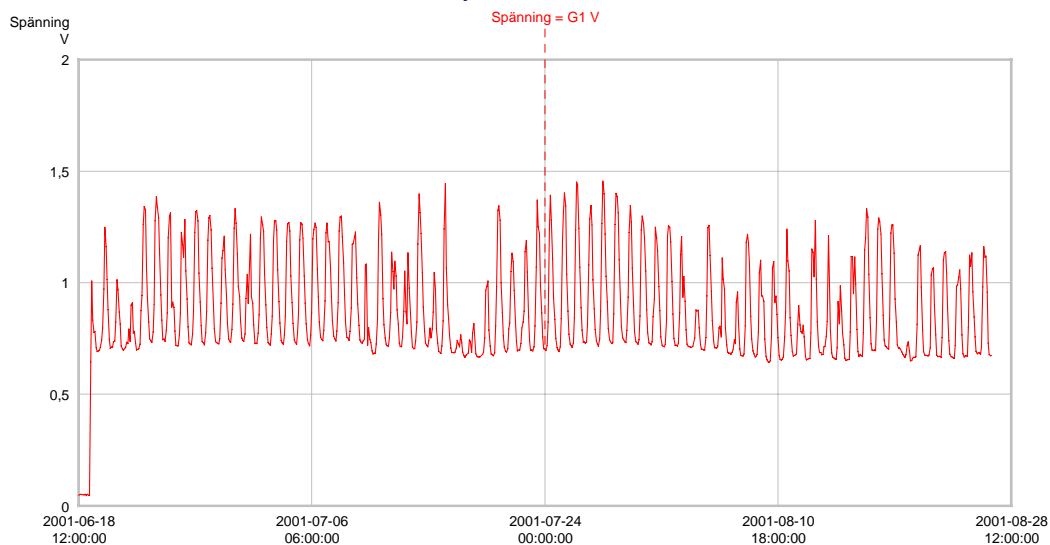


A. 2 Mätresultat loggning sommaren 2001.



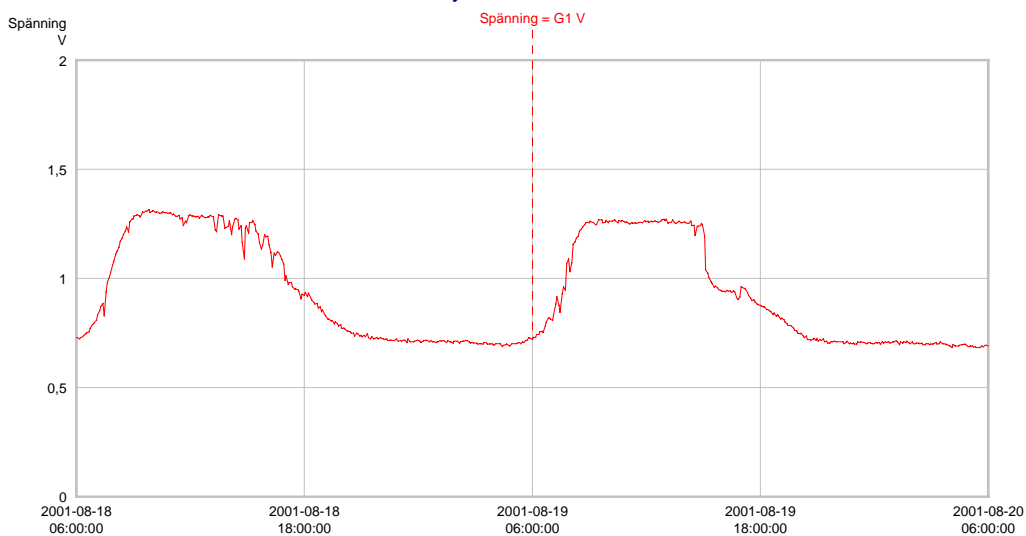
Objekt: STPP165S

Objekt: STPP165S



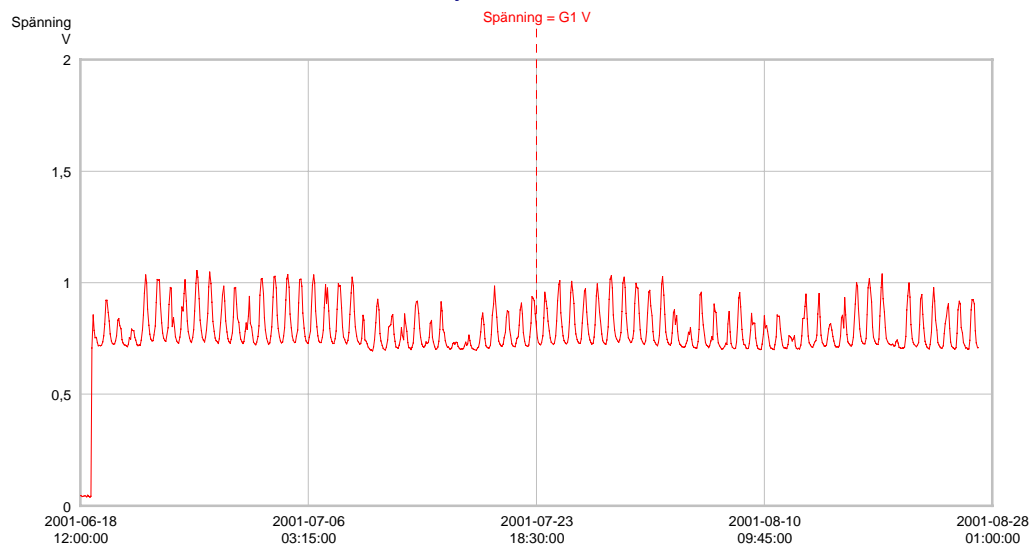
Objekt: STPP165S

Objekt: STPP165S



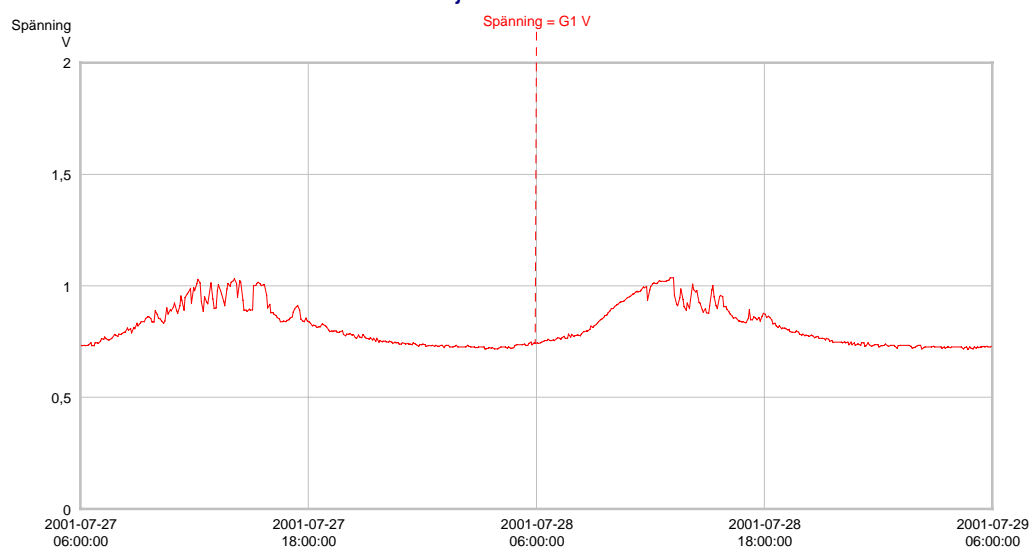
Objekt: STPP166S

Objekt: STPP166S



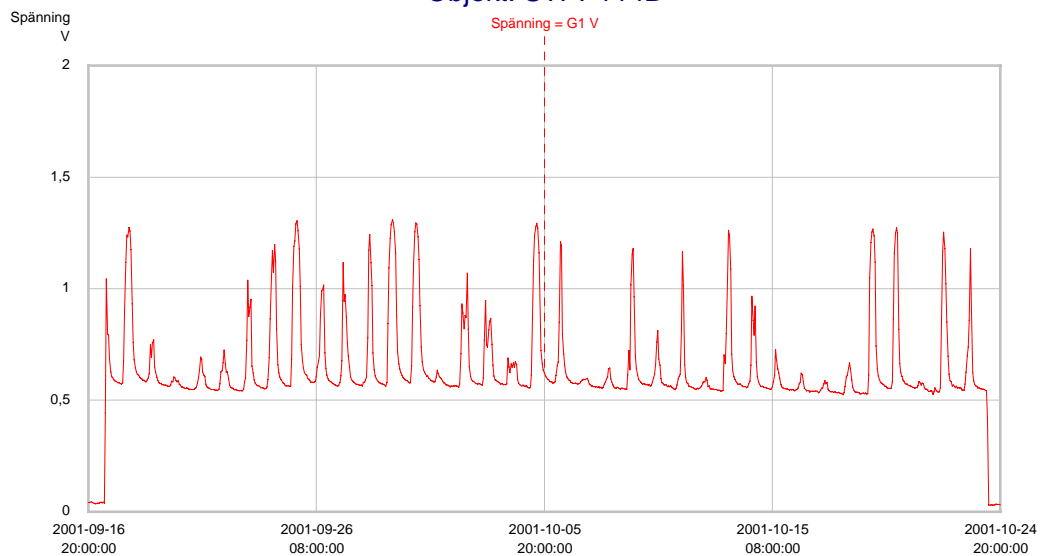
Objekt: STPP166S

Objekt: STPP166S



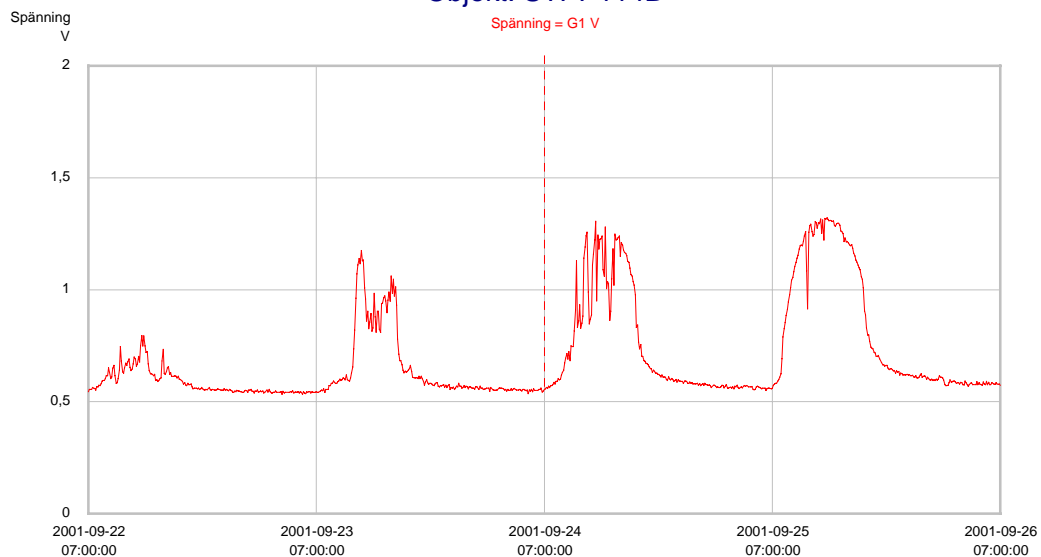
Objekt: STPP114B

Objekt: STPP114B

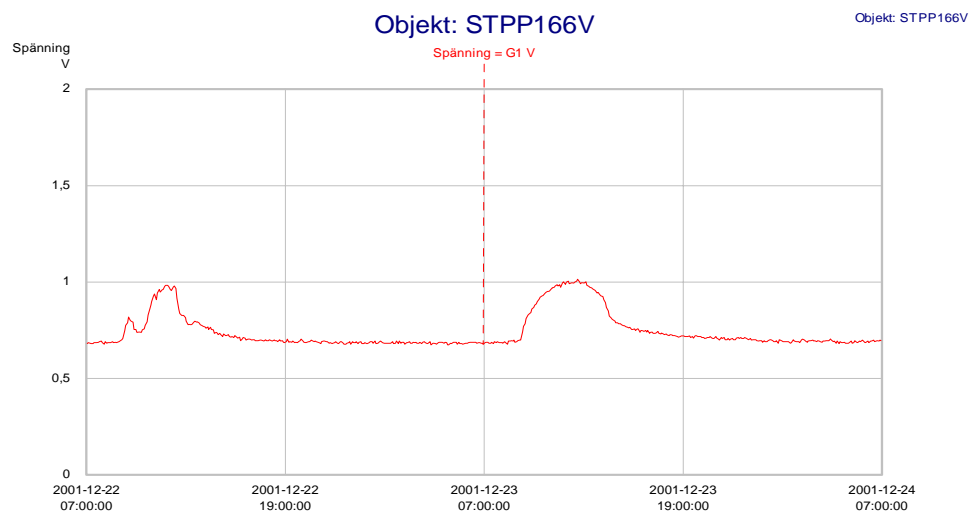
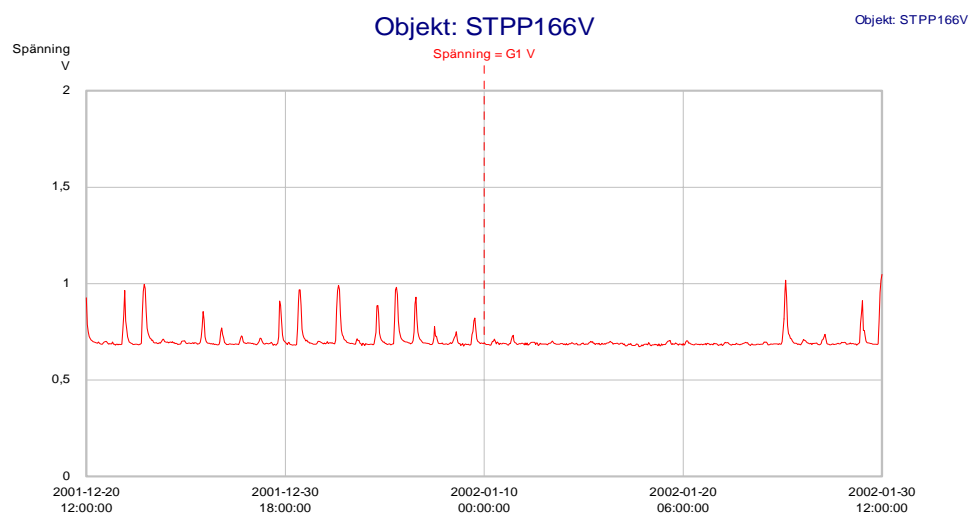


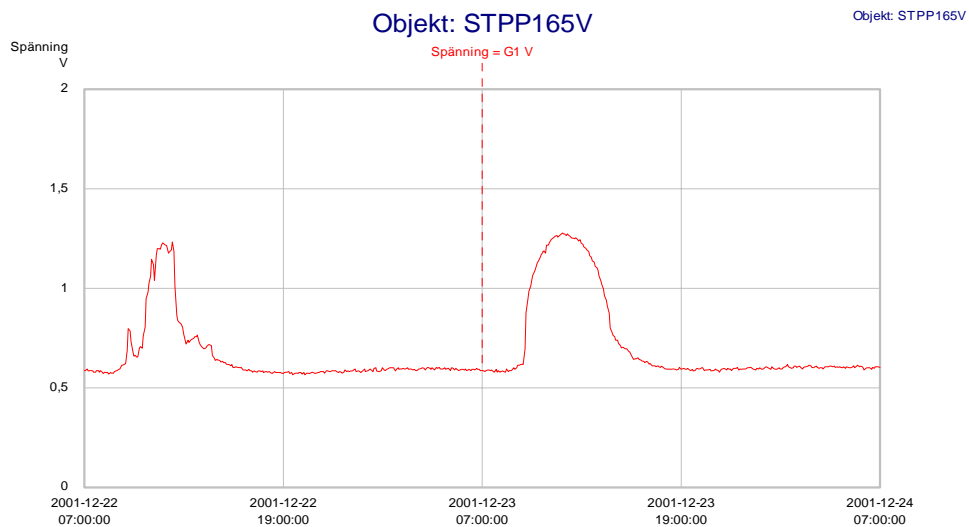
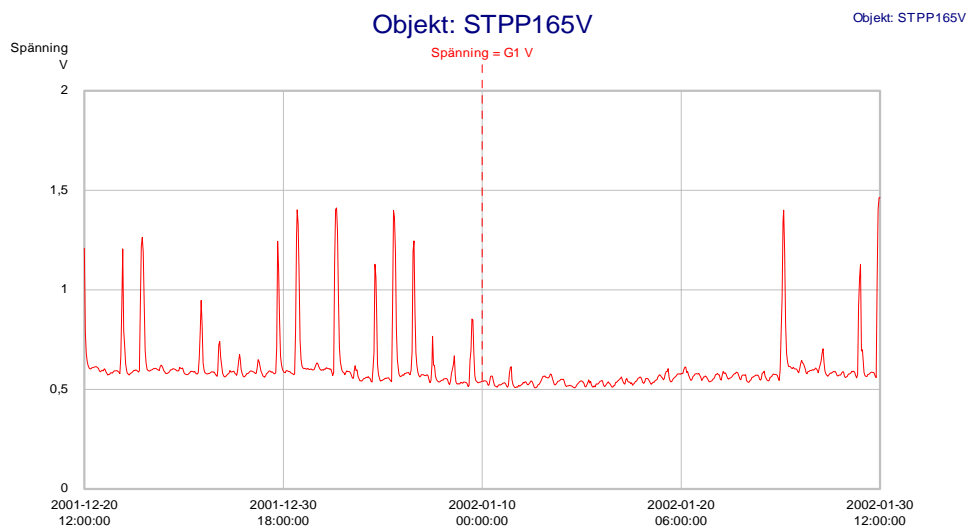
Objekt: STPP114B

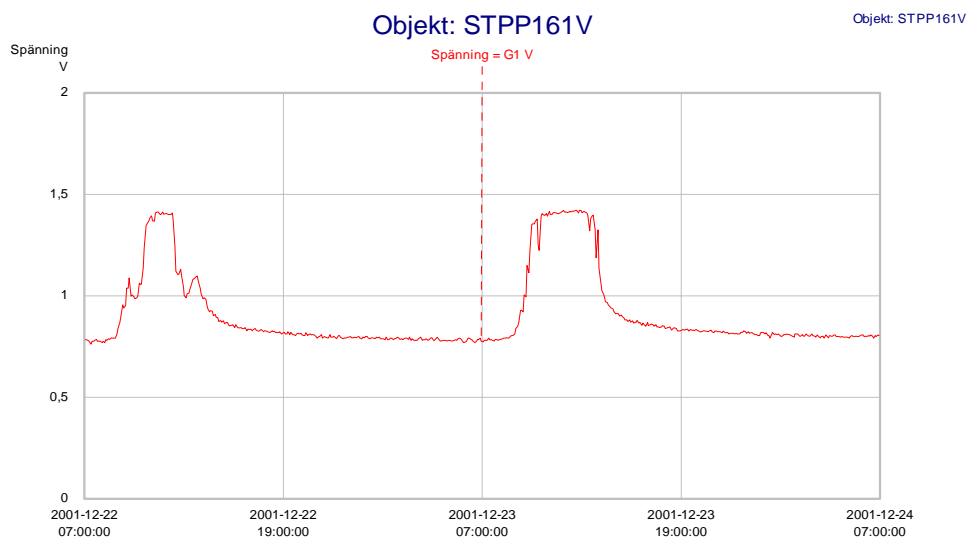
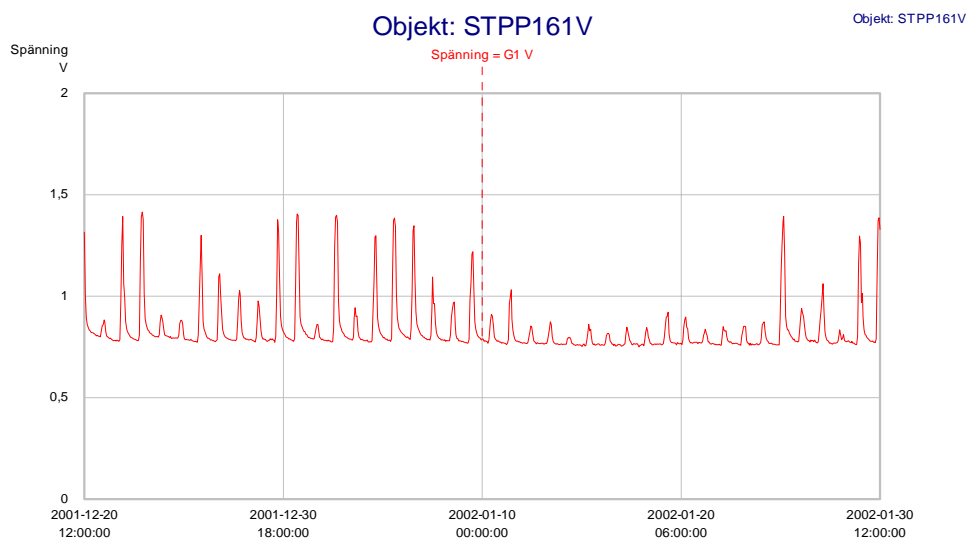
Objekt: STPP114B

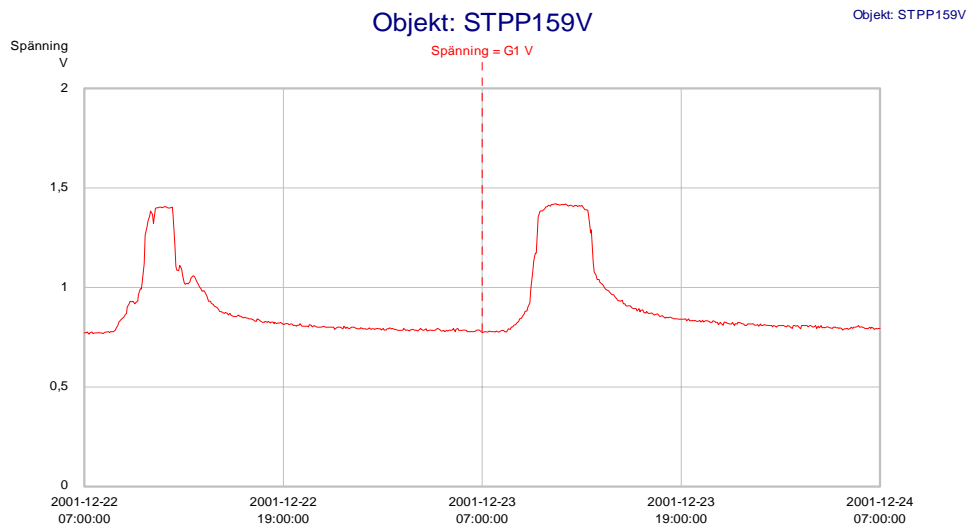
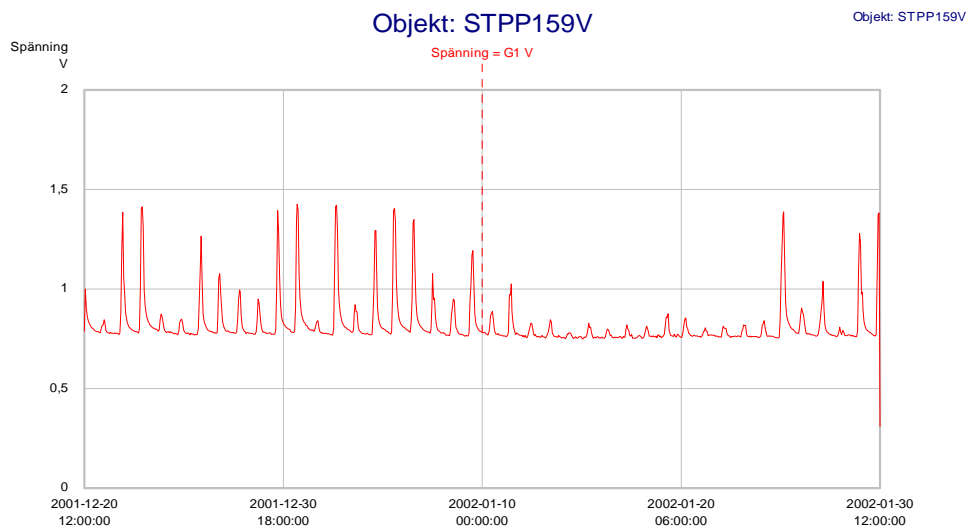


A. 3 Mätresultat loggning vintern 2001/2002.









A.4 Mätresultat loggningar hösten 2002.

Objekt: STR3036

Objekt: STR3036

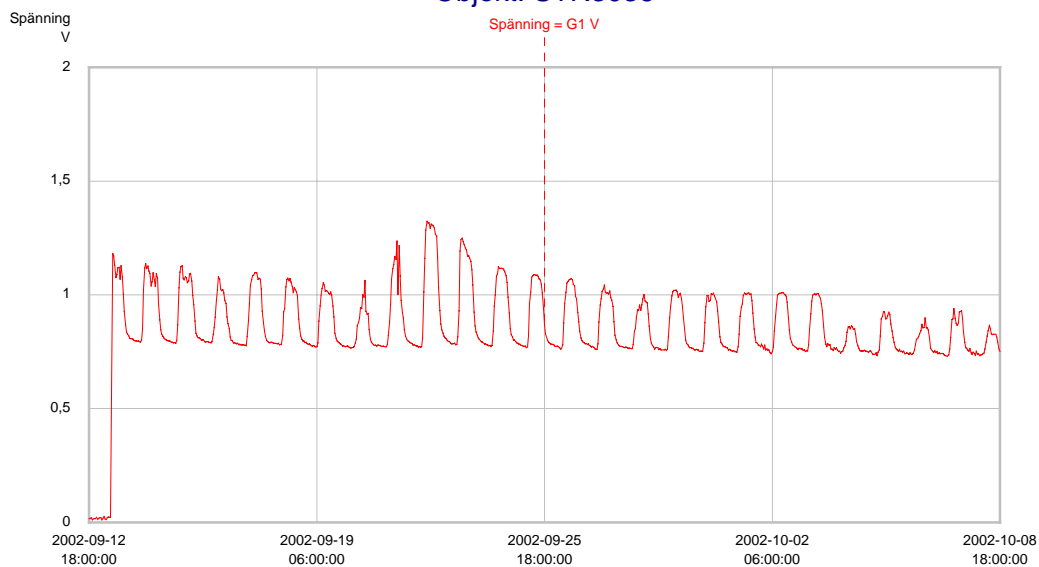


Bild 1. Stolpe 159.

Objekt: STR1252

Objekt: STR1252

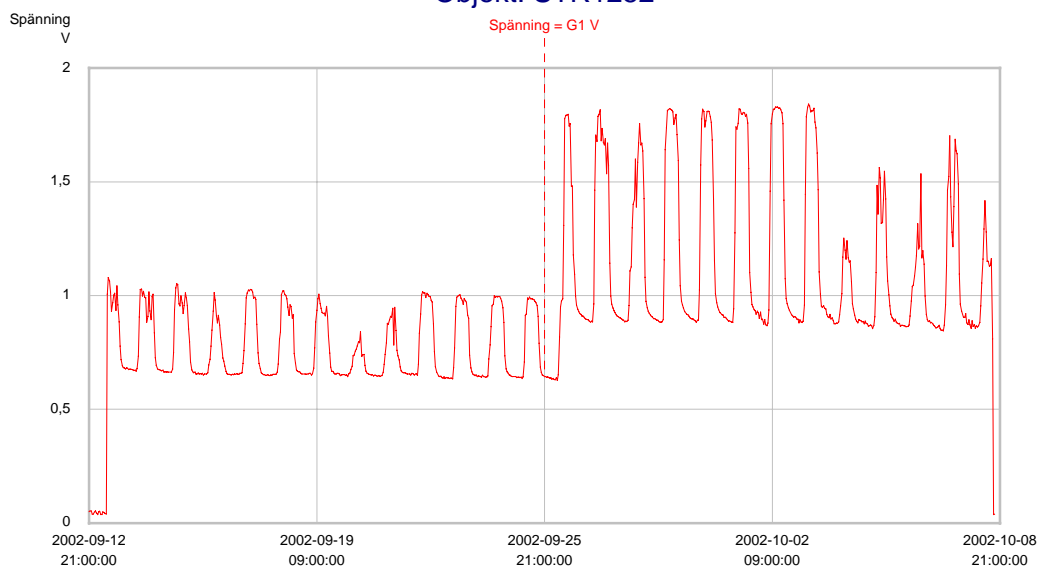


Bild 2. Stolpe 161.

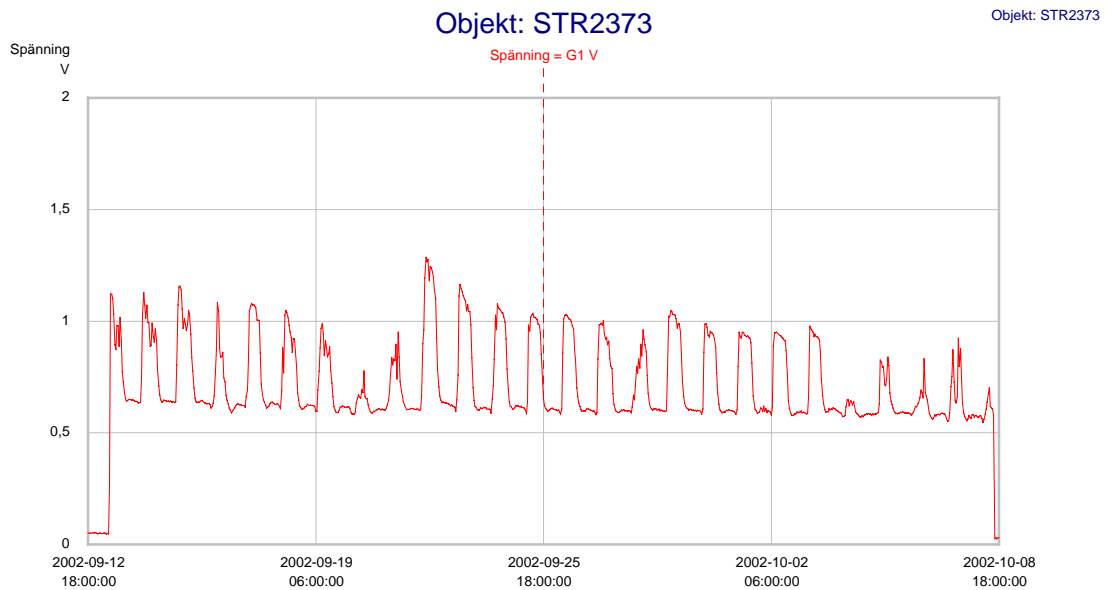


Bild 3. Stolpe 165.

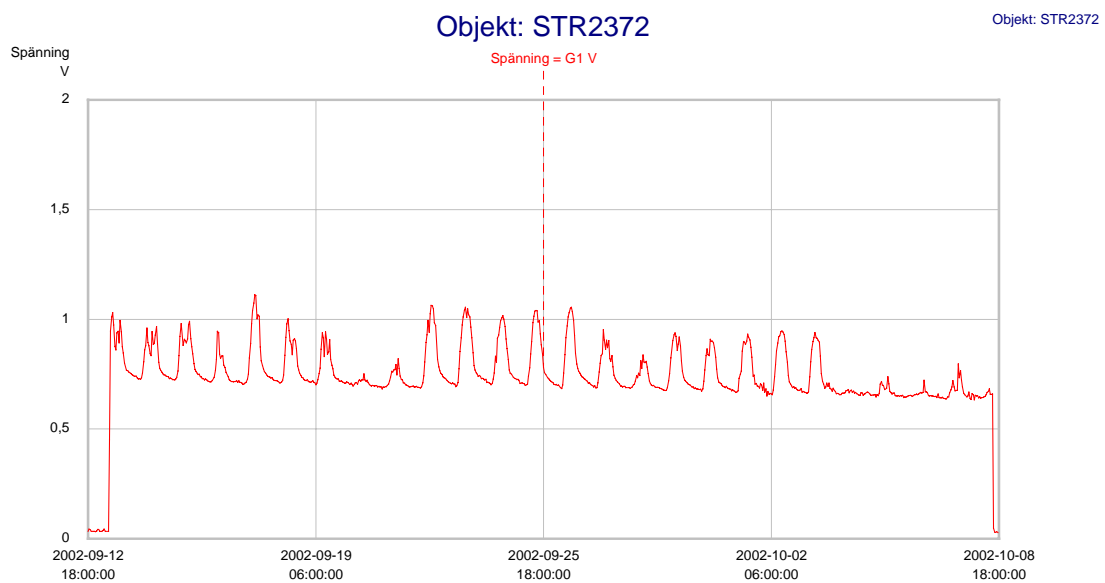


Bild 4. Stolpe 166.

A5. Besiktning

Mätning/Besiktning Solceller 2002-10-08 och 09

RII

Stolpe Plats	Solcell Fågelsp?	Potential "ON" DC V	Solcell V DC	I DC mA	V AC	Ref Diff mV	R ohm	Solcell Max I DC A
Järnväg 15.00	166H OK	P -0,71 -0,74	1,21	43	2	-70	28,1	0,045
	V OK	P -0,68 -0,69	0,3	42	1,8		7,1	0,042
								Mörkt/mulet
Landsväg 15.30	165H OK	P -0,54 -0,69	2,1	39	0,16	-20	53,8	0,044
	V OK	P -0,61 -0,63	10,1	42	0,33		240,5	0,045
								Mörkt/mulet
Torp 16.00	164H OK	P -0,73 -0,84	18,4	3,4	1		5411,8	0,045
	V OK	P -0,69 -0,85	18,5	3,2	1,6	-115	5781,3	0,04
								Mörkt/mulet
	163							
	162							
Skogsväg 16.30	161H OK	P -0,98 -1,12	14,3	11,8	0,3		1211,9	0,028
	V OK	P -0,81 -0,95	2,4	18,7	0,9	199	128,3	0,027
								Mörkt/mulet
	160							
Jaktstuga 08.00	159H OK	P -0,76 -0,81	17,9	18,3	0,57		978,1	0,12
	V OK	P -0,76 -0,79	10,1	21,3	0,18	7	474,2	0,12
								Ljust/mulet
Jaktstuga 08.30	158H OK	P -1,16 -1,25	4,14	108	0,96		38,3	0,13
	V OK	P -0,96 -1,12	1,33	44,5	0,53	142	29,9	0,068
								Ljust/mulet
	157							
Gnistg Åkergärde 09.30	156H OK	P -0,89 -0,92	23,6	14,8	0,19	8	1594,6	0,82
	V OK	P -1,05 -1,20	24,1	17	1,6		1417,6	0,81
								VX-moln sol
	155							
	154							
Vägslut 10.00	153H OK	P -1,1 -1,37	23,1	11	0,5		2100,0	0,3
	V OK	P -0,91 -1,03	22,3	13,7	0,25	6	1627,7	0,8
								VX-moln, sol

	152H OK	P -0,98 -1,08	10,1	500	0,5		20,2	0,6
AC 8,4 V	V OK	P -0,93 -1,02	3,4	162	0,5	22	21,0	0,47
Torp								VX-moln
10.45								
	151H OK	P -0,93 -1,02	3,41	225	0,21		15,2	0,42
AC 1,7 V	V OK	P -0,78 -0,94	4,56	260	0,27	35	17,5	0,51
Sankmark								VX-moln
11.30								
114 H	I OK	P -1,17 - 1,23	14,8	860	0,3			0,86
14.30 -	II OK		9,2	500				0,9
15.30	I + II		12,96	1740		-80	7,4	VX-moln, sol
114 V		P -1,18 - 1,26			0,35			Bat lad: 70 mA

Stolpe 114. 2002-10-09 ca kl 15.00

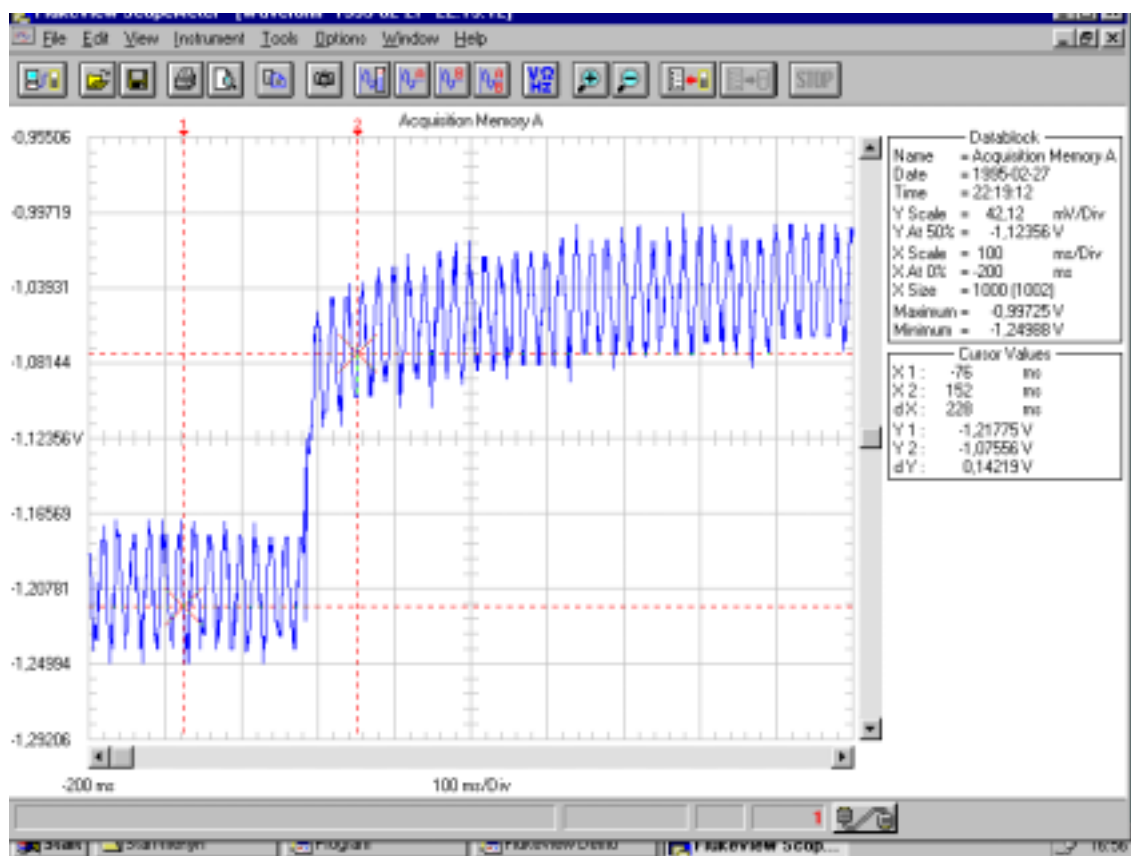


Diagram 1. Stolpe 114 "OFF-potentialen"

A. 6 Mätresultat av momentanmätning av potentialer på ramstängerna.

Potentialmätning på stolpplats 151

Ramstångs- beteckning, sett mot riktning Syd	Korrosions- potential (mV)	Potential efter installation ON/OFF (mV)	ON-potential (mV)	
			Vår (sol/moln)	Sommar (ösregn)
Vänsterben		-820/-711		
V1	-650		-920 (sol)	
V2	-620		-800 (moln)	
V3	-650		-850 (moln)	
V4	-649		-785 (moln)	
Högerben		-850/-840		
H1	-704		-950 (sol)	-735 (moln)
H2	-701		-950 (sol)	-718 (moln)
H3	-665		-1000 (sol)	
H4	-700		-1000 (sol)	

Potentialmätning på stolpplats 152

Ramstångs- beteckning, sett mot riktning Syd	Korrosions- potential (mV)	Potential efter installation ON/OFF (mV)	ON-potential (mV)	
			Vår (halvmulet)	Sommar (molnigt)
Vänsterben		-950/-868		
V1	-810		-1130	-1020
V2	-753		-1050	-1000
V3	-634		-970	-840
V4	-780		-1050	-970
Högerben		-715/-689		
H1	-710		-1020	-760
H2	-680		-1000	-883
H3	-650		-900	-692
H4	-658		-1500	-930

Potentialmätning på stolpplats 153

Ramstångs- beteckning, sett mot riktning Syd	Korrosions- potential (mV)	Potential efter installation ON/OFF (mV)	ON-potential (mV)	
			Vår (soligt)	Sommar (molnigt)
Vänsterben		-1145/-935		
V1	-540		-1000	-900
V2	-579		-1160	-980
V3	-541		-1010	-920
V4	-520		-1150	-1025
Högerben		-1320/-800		
H1	-410		-1100	Sten, torrt
H2	-439		-1080	Sten, torrt
H3	-422		-1400	Sten, torrt
H4	-508		-1130	Sten, torrt

Potentialmätning på stolpplats 156

Ramstångs- beteckning, sett mot riktning Syd	Korrosions- potential (mV)	Potential dagen efter installation ON/OFF (mV)	ON-potential (mV)	
			Vår (soligt)	Sommar (halvsol)
Vänsterben		-1475/-965		
V1	-623		-1260	-1140
V2			-1350	-1000
V3			-1580	-1200
V4			-1290	-1290
Högerben		-860/-747		
H1	-495		-1104	-855
H2			-1080	-798
H3			-880 (vatten på Ref.)	-816
H4			-1273	-940

Potentialmätning på stolpplats 158

Ramstångs- beteckning, sett mot riktning Syd	Korrosions- potential (mV)	Potential efter installation ON/OFF (mV)	ON-potential (mV)	
			Vår (soligt)	Sommar (molnigt, regn)
Vänsterben		-930/-870		
V1	-680		-1900 (torrt)	-930
V2	-660		-1490	-970
V3	-675		-1300	-850
V4	-719		-1900	-1130
Högerben		-1000/-980		
H1	-680		-1650	-1100
H2	-715		-1440	-1105
H3	-705		-1650	-1050
H4	-720		-1670	-1250

Potentialmätning på stolpplats 159

Ramstångs- beteckning, sett mot riktning Syd	Korrosions- potential (mV)	Potential efter installation ON/OFF (mV)	ON-potential (mV)	
			Vår (soligt)	Sommar (molnigt)
Vänsterben		-890/-830		
V1	-723			-1074
V2	-700		-1450	-1000
V3	-710		-1450	-1068
V4	-707		-1390	-1020
Högerben		-880/-810	-1600	
H1	-730		-1440	-1040
H2	-682		-1500 (torrt)	-1050
H3	-637		-1400	-940
H4	-700		-1500 (torrt)	-1100

Potentialmätning på stolpplats 161

Ramstångs- beteckning, sett mot riktning Syd	Korrosions- potential (mV)	Potential efter installation ON/OFF (mV)	ON-potential (mV)	
			Vår (sol/moln)	Sommar (halvsol)
Vänsterben		-1020/-905		
V1	-660		-1516	-1350
V2	-670		-1300	-1710
V3	-686		-1440	-1490
V4	-670		-1370	-1370
Högerben		-1250/-970		
H1	-588		-1350	-1230
H2	-625		-1380	-1160
H3	-600		-1600	-1105
H4	-610		-1600	-1520

Potentialmätning på stolpplats 164

Ramstångs- beteckning, sett mot riktning Syd	Korrosions- potential (mV)	Potential efter installation ON (mV)	ON-potential (mV)	
			Vår (soligt)	Sommar (molnigt)
Vänsterben		-980		
V1	-600		-700	-1120
V2	-570		Sten	-1335
V3	-556		-600	-890
V4	-560		Sten	-970
Högerben		-720		
H1	-550		Sten, torrt	-970
H2	-554		Sten, torrt	-1075
H3	-550		-1082	-990
H4	-560		-990	-1090

Potentialmätning på stolpe 165

Ramstångs- beteckning, sett mot riktning Syd	Korrosions- potential (mV)	Potential installation ON (mV)	ON-potential (mV)	
			Vår (soligt)	Sommar (mulet, regn)
Vänsterben		-914		
V1	-710		-1160	-740
V2	-714		-1052	-567
V3	-703		-1270	-814
V4	-700		-1260	-826
Högerben		-901		
H1	-680		-1423	-690
H2	-700		-1310	-750
H3	-660		-1378	-730
H4	-683		-1440	-750

Potentialmätning på stolpplats 166

Ramstångs- beteckning, sett mot riktning Syd	Korrosions- potential (mV)	Potential efter installation ON (mV)	ON-potential (mV)	
			Vår (soligt)	Sommar (mulet, regn)
Vänsterben		-670 (mörkt)		
V1	-675		-1340	-820
V2	-679		-1260	-855
V3	-677		-1460	-865
V4	-682		Sten, torrt	-890
Högerben		-680 (mörkt)		
H1	-670		-1260	-800
H2	-665		-1350	-800
H3	-686		-1520	-850
H4	-680		-1430	-875

A7 Potentialmätning mot stationär referens

Stolpplats	ON-potential (mV)			Anmärkning
	Sommar-2001	Vinter- 2002	Vår- 2002	
151	(åska)	-1235 (soligt)	-870(molnigt) - -1170 (soligt)	
152	-950 (molnigt)	-1350 (soligt)	-1150 (halvmulet)	
153	-900 (molnigt)	-1135 (soligt)	-1035 (soligt)	
156	-830 (halvsol)	Ej nåbar	-1050 (soligt)	
158	-1100 (molnigt)	Ca-1700 (soligt)	-1850 (soligt)	
159	-1095 (molnigt)	-1386 (soligt)	-1440 (soligt)	
161	-1420 (halvsol)	-1400 (soligt)	-1270 (växl molnighet)	
164	-970 (molnigt)	-260 (!) (soligt)	-514 (!)	Vinter och vår- värdena beror på lös kabel i mätplinten
165	-742 (molnigt)	-1415 (tunt moln)	-1549 (soligt)	
166	-360 (!) (molnigt)	-980 (tunt moln)	-1120 (soligt)	Sommarvärdet troligen felmätt

B Resultat från exponering av provplåtar

B.1 Resultat från exponering av stålplåtar

Prov ID	Massförlust (g)	Korrosion			Minskad korrosionsha- stighet (ggr)
		(g/m ²)	(g/m ² ,år)	(µm/år)	
398,stp 151	9,9018	402,5108	201,2554	25,8020	-
392,stp 151	8,0222	326,1041	163,0520	20,9041	1,23
395,stp 151	5,2525	213,5157	106,7578	13,6869	1,88
427,stp 152	5,3468	217,3482	108,6741	13,9326	-
399,stp 152	3,8026	154,5772	77,2886	9,9088	1,41
423,stp 152	4,0980	166,5850	83,2925	10,6785	1,30
431,stp 153	3,7297	151,6118	75,8059	9,7187	-
430,stp 153	3,9523	160,6644	80,3322	10,2990	0,94
432,stp 153	4,7849	194,5067	97,2534	12,4684	0,78
438,stp 156	28,5896	1162,1788	581,0894	74,4986	-
433,stp 156	10,1060	410,8137	205,4069	26,3342	2,83
437,stp 156	14,4070	585,6497	292,8248	37,5416	1,98
483,stp 158	4,1748	169,7075	84,8538	10,8787	-
482,stp 158	1,7901	72,7677	36,3838	4,6646	2,33
486,stp 158	1,6252	66,0648	33,0324	4,2349	2,57
492,stp 159	5,8190	236,5431	118,2715	15,1630	-
490,stp 159	1,2846	52,2205	26,1103	3,3475	4,53
491,stp 159	1,2645	51,4016	25,7008	3,2950	4,60
496,stp 161	3,2722	133,0169	66,5085	8,5267	-
493,stp 161	2,4203	98,3856	49,1928	6,3068	1,35
495,stp 161	1,0288	41,8207	20,9104	2,6808	3,18
505,stp 164	9,7732	397,2845	198,6422	25,4670	-
498,stp 164	6,8508	278,4889	139,2444	17,8519	1,43
504,stp 164	6,9701	283,3391	141,6696	18,1628	1,40
509,stp 165	6,5535	266,4020	133,2010	17,0771	-
510,stp 165	4,1002	166,6761	83,3380	10,6844	1,60
511,stp 165	5,2786	214,5764	107,2882	13,7549	1,24
517,stp 166	9,9012	402,4870	201,2435	25,8004	-
518,stp 166	8,8109	358,1663	179,0831	22,9594	1,12
520,stp 166	6,1626	250,5114	125,2557	16,0584	1,61

B.2 Resultat från exponering av kopparplåtar

Prov ID	Kontakt/ej kontakt med jordningslinan	Massförlust (g)	Korrosion			Ökad/minskad korrosionshastighet (ggr)
			(g/m ²)	(g/m ² ,år)	(µm/år)	
DIOD						
474,stp 151	Ej kontakt	0,1672	6,7969	3,3984	0,3801	-
475,stp 151	Kontakt	0,7114	28,9180	14,4590	1,6173	4,25 (ökad)
476,stp 152	Ej kontakt	0,8536	34,6996	17,3498	1,9407	-
478,stp 152	Kontakt	3,5189	143,0433	71,5217	8,0002	4,12 (ökad)
525,stp 158	Ej kontakt	0,1245	5,0617	2,5309	0,2831	-
477,stp 158	Kontakt	1,3007	52,8752	26,4376	2,9572	10,44 (ökad)
481,stp 161	Ej kontakt	0,0735	2,9863	1,4932	0,1670	-
480,stp 161	Kontakt	3,0046	122,1392	61,0696	6,8311	41 (ökad)
DIOD						
482,stp 165	Ej kontakt	0,7254	29,4862	14,7431	1,6491	-
483,stp 165	Kontakt	0,0278	1,1302	0,5651	0,0632	26 (minskad)
484,stp 166	Ej kontakt	1,1848	48,1617	24,0809	2,6936	-
485,stp 166	Kontakt	1,3015	52,9065	26,4533	2,9590	1,1 (ökad)

C Tillämningsinstruktion katodiskt skydd med solceller

Solceller.

Vid upphandling av solceller för att driva katodiskt korrosionsskydd på kraftledningsstolpar bör följande frågeställningar/punkter beaktas:

Strömbehov för stålet under marknivå, räkna som schablon med ca 35 mA/m²
 Placeringsvinkel, optimalt för vinter eller sommar solståndet?
 Placeringshöjd, stöldrisk, skuggning (linor, andra stolpbenet, träd, buskar)
 Jordresistivitet, totala kretsresistansen kontra max spänning och ström från solcellen
 Fastsättningsanordning, vindpåkänning, ramstångsdimension och riktnings-injustering
 Risken för fågelspillning
 Årsmedeleffekt, (dagsljustid ca 50 % av 8760 timmar)
 Effektgaranti
 Effektmarginal i förhållande till behov
 Årstidsberoendet, vilka årstider är behovet av korrosionsskydd störst

Vid urvalet av solcellstyp är de viktigaste parametrarna, standardtyp i rätt effektnivå, skuggningsproblemen och kostnaden.

Strömbehov

Den totala stålyta som är under marknivå tas fram utifrån ritningarna på de olika typerna av kraftledningsstolpar som förekommer på den kraftledningssträcka som skall skyddas. Som ett bra riktmärke är att räkna med ca 35 mA per m² stål som är under mark nivå. Så kallade "Portalstolpar" har normalt ca 15 m² area under marknivå.

Den totala kretsresistansen för solcellen är i mindre omfattning beroende på ledningsarean för kabel och i större omfattning beroende på längden av anoden samt jordresistiviteten mellan anoden och stålytan undermark.

Med utformning av det katodiska korrosionsskyddet med anoden i centrum av stoppenet och med en längd på ca 1,5 m, så då blir kretsresistansen ca 50 - 70 Ω vid en jordresistivitet av ca 40 Ωm.

Att minst fördubbla strömbehovet vid val av solcellseffekt är en förutsättning för att även täcka in möjligheten att få skyddsverkan vid viss molnighet. Samtidigt går det inte att gå upp i effekt obegränsat eftersom det ger andra negativa effekter och onödig kostnadsbelastning.

Placering

Att välja rätt placering för att få optimalt solutbyte är också ett val om när under året man har störst behov av det katodiska skyddet d v s när är korrosionsrisken störst över året.

Det är flera parametrar t ex markens pH, temperaturen i marken, fukthalten och tjälen som kan sluta tätt som ett lock över marken så att syretillgången reduceras, alla påverkar korrosionsrisken.

För att optimera perioden då solcellen ger energi över året är det en nästan lodrätt placering som är bäst. Den naturliga vinkeln som beror på stolpens utformning att vara bredare nertill och smalare upptill ger en nästan 90° vinkel. Rekommendationen är latituden + 20° dvs ca 79° i höjd med Stockholm och 76° i Skåne.

Tillräcklig höjd över markytan är också viktigt för att komma över nivån för en del skuggande träd och buskar men också ur stöldrisksynpunkt. En placerings höjd på 8 – 12 m över marknivå är rimlig. För att försvåra stöld är det också nödvändigt att montaget är utformat på ett sådant sätt att alla försök att skruva/borra loss solcellen i stolpen resulterar i en förstörd solcell.

Fäste

Vid urformningen av fästet är det viktigt att beakta följande punkter:

Vilken dimension är det på ramstången vid aktuell placeringshöjd

Hur är infästningsanordningen på solcellen utformad?

Hur åstadkommes inriktning till rätt vädersträck?

Skall solcellen ha möjlighet att vinklas?

Beräkning av vindpåkänningar

Risken för islaster?

Vilka stöldskyddande åtgärder skall vidtagas?

Skall fästet/solcellen förses med skydd för fågelspillning?

Korrosions skydd av fästen kontra materialet i solcellsfastet

När konstruktionen av fästet för solcellen tas fram är det lämpligt att samtidigt beakta fastsättnings anordning för kopplings-/mätbox.

Fästeanordningen för solcellen och ev kopplings-/mätboxar bör vara så utformade att de är så oberoende av ramstångens/vinkeljärnens dimension som möjligt. Detta därför att dimensionen kan variera i viss omfattning mellan typritningar och verkligheten. Solcellens fäste skall också gå att vrida till rätt vädersträck. Det krävs därför en möjlighet att justera vridningsvinkeln ca +/- 45° .

Installation

Vid installationen justeras solcellens riktning mot söder. Observera att användning av kompass för nära stora stålytor och kraftfält kan ha en kraftigt störande inverkan.

Lämpliga kablar för anslutning mellan solcellen och inert anod, resp från stålet under marknivå är t ex MK 6 mm². Detta ur flera aspekter bl a tillräcklig mekanisk hållfasthet, lågt spänningsfall och ganska flexibel vid anslutning i plintar etc. De två nerledarna från solcellen skall partvinnas och buntas fast med t ex buntband på ramstången för

undvikande av växelspanningsinduktion. Det är även viktigt att beakta så att alla kablarna är UV-beständiga t ex svart kabel.

Om solcellen har en prefabricerad kabel är det viktigt att anslutningen mot denna får en hållbar förslutning (skarvhylsor) och dragavlastning. En prefabricerad tvinnad kabel med en längd på ca 10 – 12 m är att föredra då man slipper skarvning. Det är möjligt att vid en beställning av en större kvantitet kan leverantören tillmötesgå detta krav.

Anslutningen mot stålet görs genom att pinnlöda fast en bult på ca 0,5 m djup under marknivå i ramstången och ansluta minuskabeln från solcellen med lämplig kabelsko på denna och därefter skydda anslutningen med någon form av täckmassa t ex trögflytande tectyl.

Anoden placeras i centrum av stolpbenet, dock måste stor försiktighet tas till de tvärstag som är i centrum och placerade på olika djup under neddrivningen av anodröret så att inte direktkontakt erhålles med stålet för då blir solcellen kortsluten och något katodiskt skydd erhålles ej. Anodröret drivs ned till hela anodens längd.

Koks fylls på i anodröret, efter det att Titan-anoden placerats där.

Drift med t ex växelspanningsproblem.

På en del stolpplatser kan det vara höga växelspanningsnivåer mellan marken, Cu-jordningslina och stålstolpen. Detta kan bl a bero på att den längsgående jordlinan mellan stolpspannen är i avbrott eller helt enkelt ej lagts ut, vid byggnationen av kraftlinjen. Gnistgapen kan ibland vara felaktiga (kortslutna) p g a tidigare åskurladdningar. Detta kan också ställa till komplikationer vid installation av det katodiskt korrosionsskyddet.

Underhåll

Någon form av tillsyn-/funktionskontroll är troligen nödvändig. Det är dock viktigt att konstruktion, installation och driftsättning är så utformad att underhållet kan reduceras till ett minimum. En rimlig ansatts är att det begränsas till ett besök vid stolpen med en periodtid på sex år. Kontrollen kan utföras vid ordinarie besiktning om personalen har rätt utbildning.

D Solcellsdatablad

ST 20 Solar module.

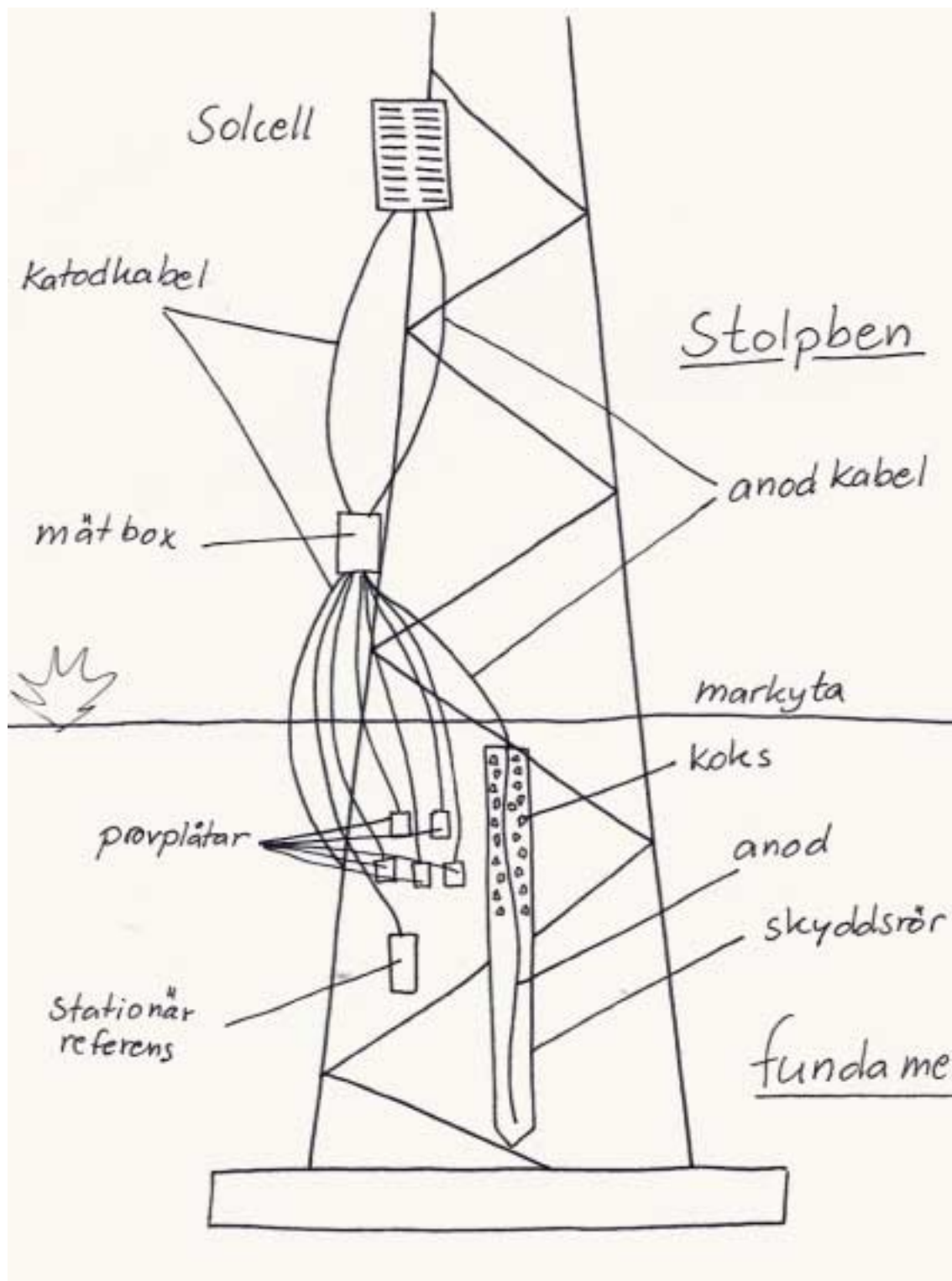
STC: irradiance level $1000\text{W}/\text{m}^2$, spectrum AM 1.5 and cell temperature 25°C

Rated power	P_r	20 W
Peak power	P_{mpp}	20 W
Peak power voltage	V_{mpp}	15,6 V
Open circuit voltage	V_{oc}	22,9 V
Short circuit current	I_{sc}	1,54 A
Minimum peak power	$P_{\text{mpp min}}$	18 W
Temperatur coefficients	αP_{mpp}	-0,6 %/ $^\circ\text{C}$
Temperatur coefficients	αV_{mpp}	-100 mV/ $^\circ\text{C}$
Maximum system voltage		25 Vdc
Weight		4,1 kg
Outside dimension		748 x 328 mm
Thickness		35 mm

Typical data at low irradiance:

The relative reduction of module efficiency at an irradiance of $200\text{W}/\text{m}^2$ in relation to $1000\text{W}/\text{m}^2$ both at 25°C cell temperature an AM 1.5 spectrum is 5%.

E Figur över installationen



F Beräkning av växelströmskorrosion på provplåtar

Beräkningsgrund

Provplåtens area:	A	(200cm ²)
Jordens resistivitet:	ρ	(Ω m)
Plåtens övergångsmotstånd:	$R=0,3 \times \rho / \text{rot}(A)$	(Ω)
Plåtens växelströmspotential	U	(V)
Ström:	$I=U/R$	(A)
Korrosion pga likström:	k_{DC}	(ca 10 kg/A.år)
Stålets växelströmskorrosion:	k_{AC}	(ca 0,5% av $k_{DC} = 50$ g/A.år)
Kopparens växelströmskorrosion:	k_{AC}	(ca 0,7% av $k_{DC} = 70$ g/A.år)
Stålets densitet	ρ_{Fe}	(8 g/cm ³)
Kopparens densitet	ρ_{Cu}	(9g/cm ³)
Korrosionshastighet:	$h=I \times k_{AC} / A / \rho_{Fe} \times 10^4$	($\mu\text{m}/\text{år}$)

Provplåtar av stål

Stolpe	ρ (Ω m)	R (Ω)	U (V)	I (A)	h ($\mu\text{m}/\text{år}$)
151	82	175	1,2	6,9E-3	2,1
152	67	143	2,8	19,6E-3	6,1
153	255	546	0,1	0,2E-3	0,06
156	210	450	0,5	1,1E-3	0,4
158	94	201	2,4	11,9E-3	3,7
159	105	225	0,7	3,1E-3	1,0
161	165	354	0,4	1,1E-3	0,4
164	465	996	0,3	0,3E-3	0,1
165	210	450	0,1	0,2E-3	0,07
166	132	283	0,4	1,4E-3	0,5

Provplåtar av koppar

Stolpe	ρ (Ω m)	R (Ω)	U (V)	I (A)	h ($\mu\text{m}/\text{år}$)
151	82	175	2,1	12E-3	4,7
152	67	143	5,1	36E-3	13,9
158	94	201	3,6	18E-3	7,0
161	165	354	0,7	2,0E-3	0,8
165	210	450	0,2	0,4E-3	0,17
166	132	283	0,8	2,8E-3	1,1

De oskyddade stålplåtarna och de kopparplåtar som ej varit i kontakt med jordningslinan har ej erhållit någon spänningssättning från växelström och därmed ingen växelströmskorrosion. Om vi adderar ovan beräknade korrosionshastigheter till dessa

plåtar erhålls en mer rättvisande bild av sann korrosion och därmed en tillförlitligare utvärdering av korrosionsskyddets effekt.

Korrosionshastigheter för stålplåtar med hänsyn taget till förmodad växelströmskorrosion på oskyddade plåtar.

Prov ID	Uppmätt korrosionshastighet ($\mu\text{m}/\text{år}$)	Beräk. växelströmskorrosion ($\mu\text{m}/\text{år}$)	Korrosionshastighet ($\mu\text{m}/\text{år}$)	Minskad korrosionshastighet (ggr)
398,stp 151	25,8	2,1	27,9	1,33
392,stp 151	20,9		20,9	
395,stp 151	13,7		13,7	
427,stp 152	13,9	6,1	20,0	2,02
399,stp 152	9,9		9,9	
423,stp 152	10,7		10,7	
431,stp 153	9,7	0,06	9,8	0,95
430,stp 153	10,3		10,3	
432,stp 153	12,5		12,5	
438,stp 156	74,5	0,4	74,9	2,85
433,stp 156	26,3		26,3	
437,stp 156	37,5		37,5	
483,stp 158	10,9	3,7	14,6	3,10
482,stp 158	4,7		4,7	
486,stp 158	4,2		4,2	
492,stp 159	15,2	1,0	16,2	4,91
490,stp 159	3,3		3,3	
491,stp 159	3,3		3,3	
496,stp 161	8,5	0,4	8,9	1,41
493,stp 161	6,3		6,3	
495,stp 161	2,7		2,7	
505,stp 164	25,5	0,1	25,6	1,43
498,stp 164	17,9		17,9	
504,stp 164	18,2		18,2	
509,stp 165	17,1	0,07	17,2	1,60
510,stp 165	10,7		10,7	
511,stp 165	13,8		13,8	
517,stp 166	25,8	0,5	26,3	1,14
518,stp 166	23,0		23,0	
520,stp 166	16,1		16,1	

Korrosionshastigheter för kopparplåtar med hänsyn taget till förmodad växelströmskorrosion på plåtar isolerade från jordningslinan.

Prov ID	Uppmätt korrosions-hastighet ($\mu\text{m}/\text{år}$)	Beräk. växelströms-korrosion ($\mu\text{m}/\text{år}$)	Korrosions-hastighet ($\mu\text{m}/\text{år}$)	Minskad korrosionshastighet (ggr)
DIOD 474,stp 151	0,38	4,7	5,08	3,1 (minskad)
475,stp 151	1,62		1,62	
476,stp 152	1,94	13,9	15,84	2,0 (minskad)
478,stp 152	8,00		8,00	
525,stp 158	0,28	7,0	7,28	2,5 (minskad)
477,stp 158	2,96		2,96	
481,stp 161	0,17	0,8	0,87	7,9 (ökad)
480,stp 161	6,83		6,83	
DIOD 482,stp 165	1,65	0,17	2,35	40 (minskad)
483,stp 165	0,06		0,06	
484,stp 166	2,69	1,1	2,80	1,1 (ökad)
485,stp 166	2,96		2,96	

Anm. Tar man hänsyn till förväntad växelströmskorrosion så kan man konstatera att dioderna har haft en skyddande effekt dvs motverkat sekundärverkan på kopparlinan. Att korrosionen skulle vara högre på plåtar som inte har kontakt med jordlinan (stp 152 och 158) är inte troligt. Sannolikt har växelströmskorrosionen överskattats i dessa fall. Uppmätt växelspanning är momentanvärden och medelvärdet är troligen lägre. Intressant att notera är dock att läckströmspåverkan på jordningslinan endast är några $\mu\text{m}/\text{år}$.

ELFORSK

SVENSKA ELFÖRETAGENS FORSKNINGS- OCH UTVECKLINGS – ELFORSK – AB
Elforsk AB, 101 53 Stockholm. Besöksadress: Olof Palmes Gata 31
Telefon: 08-677 2530. Telefax 08-677 2535
www.elforsk.se