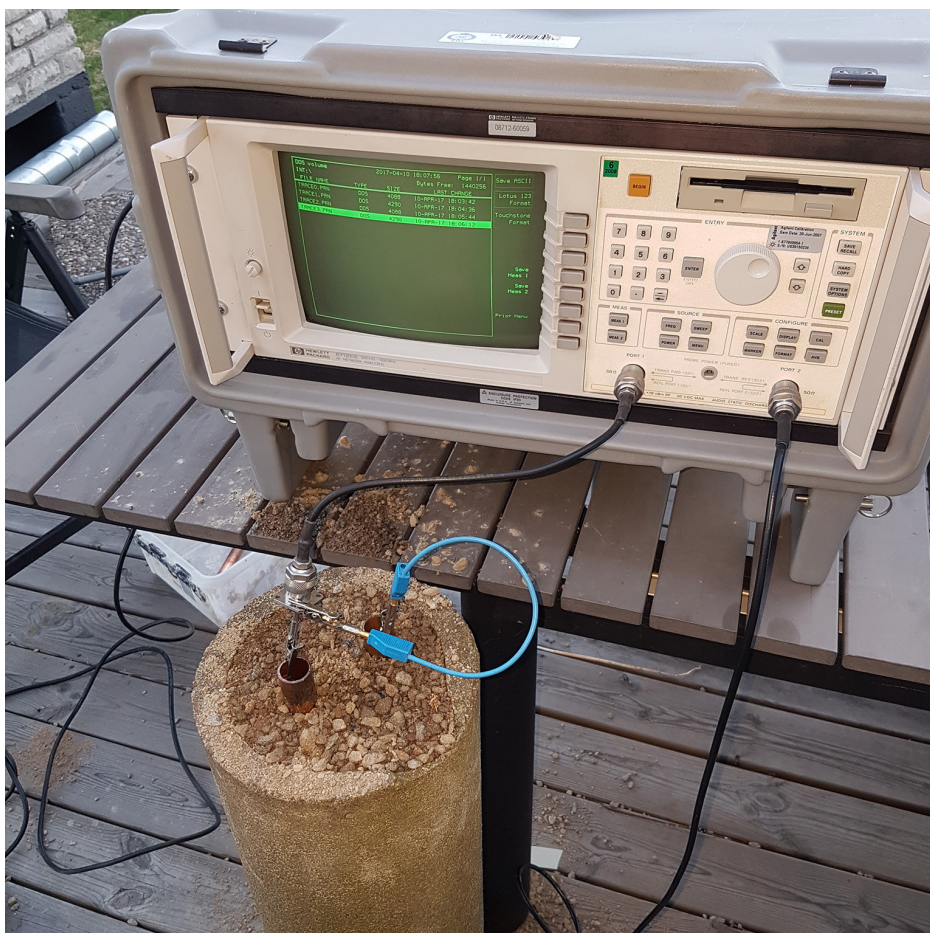


# DIAGNOSTIK AV JORDLINENÄT MED NÄTVERKSANALYSATOR

RAPPORT 2017:421





# **Diagnostik av jordlinenät med nätverksanalysator**

HANS EDIN

ISBN 978-91-7673-421-6 | © ENERGIFORSK augusti 2017

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: [kontakt@energiforsk.se](mailto:kontakt@energiforsk.se) | [www.energiforsk.se](http://www.energiforsk.se)



## Förord

Rapporten är ett resultat av ramprogrammet för Underhåll, Diagnostik och Reinvesteringsstrategi som startades av Energiforsk under 2015 och som går under benämningen Underhåll av elnät 2015-2020. Syftet är att tillsammans identifiera och formulera de problem som finns inom underhållsområdet, där företagsanpassade lösningar inte är ekonomiskt försvarbara, utan gemensamma lösningar eftersöks. I programmet upphandlas sedan genomförandet av projektet hos de kompetenser som är identifierade som bäst inom området. Programmet ska också kunna ta beslut om att produktifiera innovativa idéer inom intresseområdet vid de tillfällen när vilja och förutsättningar finns hos programkunderna. Kopplingen till InnoEnergy finns framtagen för detta ändamål. Ett annat sätt är att söka implementering via EBR-ar-betet inom Energiföretagen Sverige. Visionen är att resultaten från programmet ska ge ett bättre tekniskt och finansiellt beslutsunderlag för val mellan olika satsningar i elnätet i syfte att upprätthålla eller höja dess prestanda. Idéproduktionen initieras främst från de problem och uppkomna behov som finns hos elnätsföretagen.

De finansierande företagen i ramprogrammet är:

|                                      |                               |
|--------------------------------------|-------------------------------|
| Svenska Kraftnät                     | Falu Energi&Vatten AB         |
| Vattenfall Eldistribution AB         | Eskilstuna Energi & Miljö AB  |
| Ellevio AB                           | Karlstads El- och Stadsnät AB |
| ABB AB                               | Borås Elnät AB                |
| Göteborg Energi AB                   | Luleå Energi Elnät AB         |
| Elinorr ek. för.                     | Kraftringen Elnät AB          |
| Skellefteå Kraft Elnät AB            | Nacka Energi AB               |
| Jämtkraft Elnät AB                   | C4 Elnät AB                   |
| Umeå Energi Elnät AB                 | Pite Energi AB                |
| Jönköping Energi Nät AB              | Mälarenergi Elnät AB          |
| Tekniska Verken i Linköping Elnät AB | Kungälv Energi AB             |
| Öresundskraft AB                     | Bodens Energi Nät AB          |

Programmets styrgrupp år 2017 av består följande personer:

Mats-Erik Jansson, Jämtkraft Elnät AB, Ordförande  
 Johanna Rosenlind, Mälarenergi AB, Vice ordförande  
 Hans Lagergren, Svensk Kraftnät  
 Kenneth Stefansson, Vattenfall Eldistribution AB  
 Magnus Lommerdal, Ellevio AB  
 Robert Saers, ABB AB, CRC  
 Christer Gruber, Energiföretagen Sverige  
 Kristofer Andersson, Göteborg Energi Nät AB  
 Reyna Lind, Elinorr Ek. För.  
 Mats Javebrink, Jönköping Energi Elnät AB  
 Christian Cleber, Tekniska Verken  
 Mats Råberg, Kraftringen AB  
 Henrik Karlsson, Kungälv Energi AB  
 Tobias Hannu, Bodens Energi Nät AB  
 Anton Fagerström, Energiforsk AB, Sekreterare

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet och publiceringen innebär inte att Energiforsk har tagit ställning till innehållet.

## Sammanfattning

**Jordlinjenät i ställverk är av stor betydelse för den mänskliga säkerheten. Avbrott eller kraftig korrosion i jordlinjenätet medför en ökad risk för t.ex. högre steg- och beröringsspänningar inom ställverket.**

I detta projekt har först en litteraturstudie gjorts kring befintliga metoder för att undersöka jordlinjenät. Det finns ett flertal möjliga metoder som använder sig av galvanisk kontaktering för att injicera en ström i jordlinjenätet, såväl DC som AC-strömmar har använts. Nätets respons kan sedan analyseras genom mätning av spänningar på eller kring nätet eller genom mätning av magnetfält. Spänningsmätning kan genomföras endera genom att mäta potentialskillnaden mellan nätets olika noder - vilket kräver galvanisk kontaktering - eller genom att mäta skillnaden i ytpotential mellan olika punkter på markytan. En uppfattning om nätets intakthet kan sedan bildas genom att betrakta potentialfördelningen eller genom att man försöker beräkna nätets grenresistanser. Mätning av magnetfält kan genomföras med t.ex. spolar (kräver AC) eller Hall- och magnetoresistiva sensorer vilket funkar även vid DC. Resultaten kan analyseras genom att t.ex. jämföra mätningen med förväntat magnetfält. Det finns också metoder som bygger på rent induktiv excitering med en extern spole och mätning av nätets respons med en annan spole. En sådan metod behöver ingen galvanisk kontaktering alls.

Den metod som har undersökts mer i detalj i detta projekt är en metod som använder sig av en nätverksanalysator som skulle kunna kontakteras till jordlinjenätet. Experimenten har genomförts på en modell där en förenklad geometri har skapats med kopparrör inbäddade i ett lager med grus. Den mätuppställning som togs fram skapades för att mäta spridningsparametern  $S_{11}$ , vilket i princip är reflexionskoefficienten mellan mätobjekt och matande koaxiala ledning. Den nätverksanalysator som användes exciterade med ett frekvenssvep mellan 300 kHz och 1300 MHz och responsen gavs i frekvensdomän som amplitud och fas hos  $S_{11}$ .

Resultaten påvisar att en nätverksanalysator kan ge intressanta resultat och att avbrott i jordlinan kan detekteras (vilket kan göras med enkel kontaktprovare) men även i viss mån analyseras djupare. Resultaten är dock starkt beroende av fyllnadsmaterialets dielektriska egenskaper, i det här fallet grus. Resultaten visar att grusets dielektricitetskonstant och konduktivitet ligger kring 10 respektive  $10^{-3}$  S/m (resistiviteten kring  $10^3 \Omega\text{m}$ ). Korrodering eller mindre förändringar på ledarstrukturen visade sig i simuleringar vara svåra att upptäcka pga. grusets komplexa dielektriska beteende.

Projektet drar slutsatsen att det rimligen bör vara enklare att diagnosticera jordlinjenät med någon av de diskuterade induktiva metoderna än med nätverksanalysator där resultaten blir starkt påverkade av markens dispersiva egenskaper.

## Summary

**Grounding grids in substations are of great importance for the safety of people inside the station. An interrupted conductor or severe corrosion may imply an increased risk for higher step- and touch voltages within the substation.**

In this project a literature study has first been performed around existing methods for diagnose of grounding grids. There exist a number of possible methods that injects a current in the grid through galvanic contacts, both DC and AC currents are possible to use.

The response of the network can then be analyzed through measurements of voltages on or around the grid, or through measurements of the created magnetic fields. Voltage measurements can be performed by measuring the potential difference between different nodes in the ground grid – that requires galvanic contact – or by measuring the difference in surface potential between different points on the ground surface. A picture of the integrity of the network can be achieved by analyzing the potential distribution or by an attempt to compute the branch resistances of the grid.

Measurements of the magnetic flux density can be performed either by pick-up coils (requires AC) or by Hall sensors or magnetoresistive sensors that work also for DC. The results can be analyzed by comparing the measurements by expected magnetic flux density. There are also methods that excite the grid by inducing currents in the grid from an exciter coil and measure the response by another coil – such a method requires no galvanic contacting.

The method that has been investigated more in detail in this project is a method that makes use of a network analyzer that may be possible to connect to the grounding grid. The experiments and simulations have been performed on a model where a simplified geometry has been created by copper tubes embedded into gravel. This setup was designed in order to measure the scattering parameter  $S_{11}$ , i.e. in principle the reflection coefficient between the measurement object and the feeding coaxial cable. The network analyzer that was used excited with a frequency sweep between 300 kHz and 1300 MHz and the response was provided in frequency domain as amplitude and phase of  $S_{11}$ .

The results show that a network analyzer can give interesting data and that an interruption in the ground can be detected (that can also be done through a simple contact tester), but also to a certain extent give more details about the interruption. The results are strongly dependent of the dielectric properties of the filler material, in this case gravel. The results show that the dielectric constant and conductivity is around 10 and  $10^{-3}$  S/m (resistivity around  $10^3 \Omega\text{m}$ ) respectively. Corrosion or smaller changes in the conductor structure showed in simulations to be hard to detect due to the complex dielectric behavior of the gravel.

The project leads to the conclusion that diagnostics of grounding grids should be simpler through any of the mentioned inductive methods than through a network analyzer where the results are strongly dependent on the soils dispersive properties.

# Innehåll

|          |                                                                                                  |           |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Inledning</b>                                                                                 | <b>7</b>  |
| 1.1      | Bakgrund                                                                                         | 7         |
| 1.2      | Syfte och mål                                                                                    | 7         |
| 1.3      | Genomförande                                                                                     | 7         |
| <b>2</b> | <b>Litteraturstudie kring befintliga metoder för att diagnosticera jordlinjenät</b>              | <b>10</b> |
| 2.1      | Ströminjicerande metoder                                                                         | 10        |
| 2.1.1    | Injicering av DC och AC strömmar samt mätning av potentialskillnader och efterföljande nodanalys | 10        |
| 2.1.2    | Injicering med höga DC-strömmar                                                                  | 11        |
| 2.1.3    | Ytpotentialsbestämning                                                                           | 11        |
| 2.1.4    | Magnetfältsmetod                                                                                 | 12        |
| 2.2      | Transient elektromagnetisk metod                                                                 | 13        |
| <b>3</b> | <b>Mätningar på modellexperiment</b>                                                             | <b>14</b> |
| 3.1      | Kompletterande Dielektriska mätningar på fyllnadsmaterialen, 100 Hz- 1 MHz                       | 15        |
| 3.2      | Mätningar med nätverksanalysator på ledningspar inbäddat i grus – kortsluten ände                | 20        |
| 3.2.1    | Inverkan av ökade ledningsförluster - $r$                                                        | 26        |
| 3.2.2    | Inverkan av markkonduktiviteten - $\sigma$                                                       | 26        |
| 3.2.3    | Slutsatser – ledning med kortsluten ände                                                         | 28        |
| 3.3      | Mätningar med nätverksanalysator på ledningspar inbäddat i grus – avbrott i änden                | 29        |
| 3.3.1    | Avbrottet i änden där $Z_T = \infty$ ersatts med en anpassad komplex impedans.                   | 30        |
| 3.3.2    | Slutsatser – ledning med avbrott i änden                                                         | 32        |
| <b>4</b> | <b>Slutsatser</b>                                                                                | <b>33</b> |
| <b>5</b> | <b>Referenser</b>                                                                                | <b>34</b> |

# 1 Inledning

## 1.1 BAKGRUND

Jordning av icke normalt strömförande delar är en mycket viktig del av skyddssystemet i ett elkraftnät. Jordningen har som syfte att hålla steg- och beröringsspänningar på säkra nivåer. Steg- och beröringsspänningar uppstår när höga strömmar sluts genom den resistiva jorden vid fel mellan fasledare och jord (jordfel) eller från strömmar från åsköverslag.

Risken för steg- och beröringsspänningar är störst i närheten av de metalliska delar som tillhör elsystemet. Inom ett ställverk, transformatorstation, etc. byggs därför ett jordlinjenät under hela ställverket till vilket samtliga ledande föremål som metallstolpar, stativ, transformatorstankar, etc. ansluts – dvs. jordas. Med en sådan metod säkerställer man att steg och beröringspotentialer förblir låga så länge jordlinjenätet är intakt. Utanför jordningssystemet kan höga steg- och beröringsspänningar uppstå, beroende på jordlinjesystemets storlek och markens resistivitet – vilka tillsammans bildar jordtagsresistansen sett från felstället. För att säkerställa tillräckligt låga steg- och beröringsspänningar måste man säkerställa att jordtagsresistansen är tillräckligt låg. Jordtagsresistansen hos framförallt luftledningsstolpar påverkar även risken för så kallat back-överslag mellan stolpe och fasledare om strömmen från ett åsköverslag möter en för hög impedans på dess väg mot jord eftersom stolpens potential då kraftigt höjs relativt faslinans.

Problem i jordlinjenät kan i princip orsakas på två sätt:

1. Genom korrosion av metallen i jordledaren som så småningom leder till att ledaren förtunnas och rostar av.
2. Genom avbrott i jordledaren orsakade av andra orsaker som t.ex. att en lödning i en nod har lossnat eller att ledaren brustit av andra orsaker, t.ex. pga. upprepade höga felströmmar eller åsknedslag. En kombination av 1) och 2) kan förstås också vara orsaken.

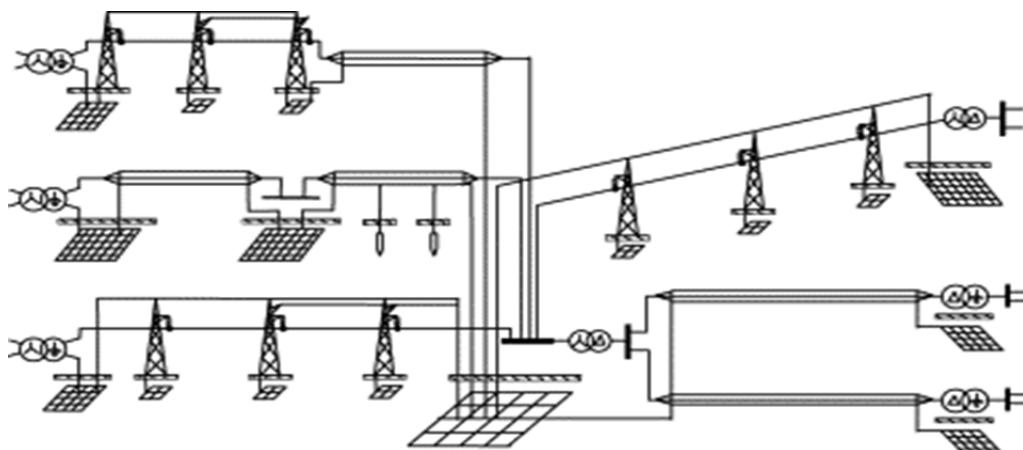
## 1.2 SYFTE OCH MÅL

Syftet med projektet är att övergripande undersöka vilka metoder som skulle kunna användas för att diagnosticera tillståndet hos ett jordlinjenät i ett ställverk.

Projektet har som mål att avgöra om högfrekvensmätningar med nätverksanalysator (300 kHz – 1300 MHz) skulle kunna användas för att diagnosticera ett jordlinjenät.

## 1.3 GENOMFÖRANDE

I projektet tänks jordlinjenät vara konstruerade enligt vad som illustreras i Figur 1.



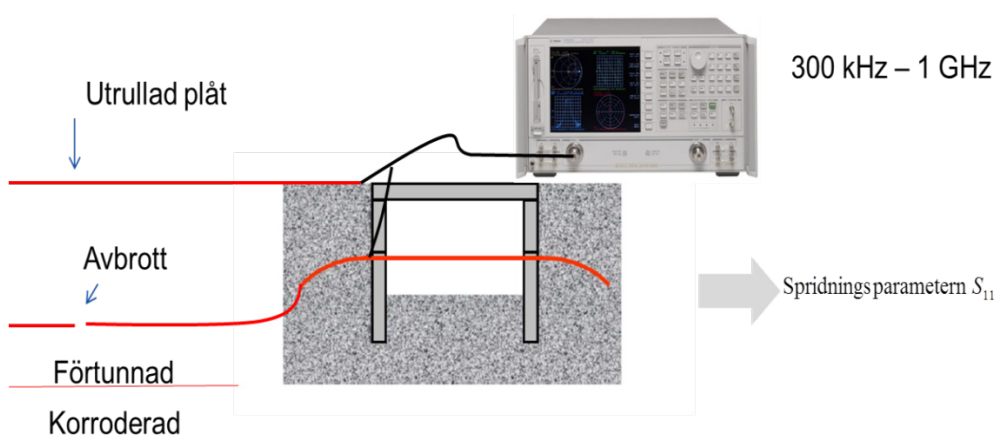
Figur 1 Jordlinjenät i anslutning till stolpar och stationer/ställverk i ett elkraftsystem. [1]

Jordlinjenät i stationer är vanligen förlagda ca 0,5 – 1 meter under markytan [2] enligt Figur 2 nedan:



Figur 2 a) Förläggning av 35 mm² jordlina i mark. b) Åtkomst till jordlina genom mätbrunn. [2]

En av de föreslagna idéerna kring projektet var att ansluta en nätverksanalysator till jordlinjenätet eller en modell av jordlinjenätet. Figur 3 nedan visar på en möjlig variant av en sådan mätuppställning. Den uppställning som sedan analyserats i experimenten är en förenklad variant av denna idé. I Figur 3 förutsätts att jordlinan är åtkomlig åtminstone på en punkt i en mätbrunn. Jordlinan kan tänkas ha ett avbrott eller ha andra defekter som t.ex. att vara kraftigt korroderad.



**Figur 3** Möjlig uppkoppling för diagnostik av jordlinjenät med nätverksanalysator.

I kapitel 2 redovisas en litteraturstudie som utförts kring befintliga metoder för diagnostik av jordlinjenät. Kapitel 3 redovisar mätningar och simuleringar som utförts med nätverksanalysator på en modell som i princip avser efterlikna den elektriska miljön kring ett jordlinjenät. Kapitel 4 innehåller slutsatser från projektet och kapitel 5 innehåller en sammanställning av de referenser som använts.

## 2 Litteraturstudie kring befintliga metoder för att diagnosticera jordlinjenät

Litteraturstudien behandlar inte generella modeller för ett jordningssystem under transienta förhållanden som t.ex. blixtnedslag. En bra utgångspunkt för sådana problem är Olsens och Grcevs artikel [3] och referenser i denna.

En annan generellt bra artikel om jordningssystem och jordtagsresistanser är Griffiths och Pillings relativt omfattande kapitel "Earthing" i [4].

När det gäller de elektrokemiska aspekterna kring korrodering av ledare så är det något som är mycket behandlat, en referens som utgångspunkt är Lawsons artikel [5].

### 2.1 STRÖMINJICERANDE METODER

De flesta metoder som används för att detektera fel i jordlinjenät baseras på injektion av ström mellan två eller flera noder i jordlinjenätet [6, 7]. Referens [6] från 2016 med referenser har en bra inledning som ger en bra bild av vad som använts och rekommenderas.

Injicering av ström (DC eller AC) i jordlinjenätet och uppmätning av potentialer i nätet orsakade av strömmarnas fördelning. Vid DC kan varje gren (eng. branch) i nätet modelleras med sin resistans  $R_{ij}$  och Ohms lag gäller mellan grenströmmar och potentialskillnaden mellan olika noder:  $V_i - V_j = R_{ij} I_{ij}$ .

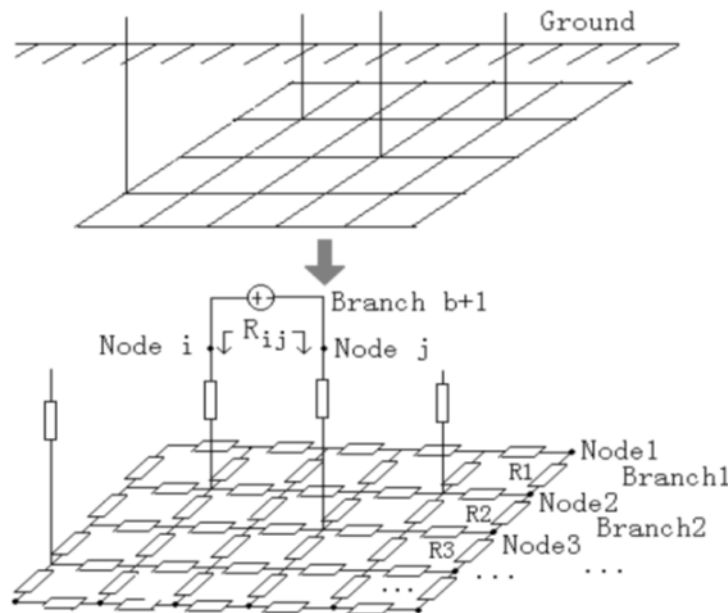
En DC-resistansmätning, kan utföras mellan två godtyckliga punkter i nätet. Vid sådana mätningar används i praktiken en Kelvinbrygga [8], även kallad Thomsonbrygga (William Thomson, 1824-1907 adlades 1892 till "Lord Kelvin", därför förekommer såväl Thomson som Kelvin). Det som Kelvinbryggan specifikt hanterar är att mätsladdarnas resistanser i praktiken är större än mätobjektets resistans och skulle därför förstöra mätningen, men Kelvinbryggans konstruktion eliminerar resistansen i mätsladdarna. Grenresistanserna kan beräknas utifrån de uppmätta resistanserna mellan godtyckliga noder.

En klar nackdel med dessa metoder är att man måste ha tillgång till ett större antal kontakteringspunkter i det nedgrävda jordlinjenätet.

#### 2.1.1 Injicering av DC och AC strömmar samt mätning av potentialskillnader och efterföljande nodanalys

Ett flertal artiklar [9-12] behandlar jordlinjenätet som ett rent kretsproblem med resistanser (DC) eller mer generellt med impedanser (AC). Strömmar initieras mellan två punkter i nätet och potentialen i förhållande till en referenspunkt (en av injiceringspunkterna) uppmäts i flertalet noder – ju fler desto bättre, se Figur 4. En klar nackdel är dock att man inte så lätt kommer åt så många noder utom vid nedledarna till jordlinjenätet. Det är dock inte så lätt att se i litteraturen att man verkligen lyckas med denna metod vid praktiska mätningar. Det inversa

problemet att räkna fram resistanserna eller impedanserna är också illakonditionerat, vilket gör metoden besvärlig.



Figur 4 Jordlinjenät representerat som ett resistansnät eller mer generellt som ett impedansnät. [11]

### 2.1.2 Injicering med höga DC-strömmar

Kostic et al [6] använder sig av 100 A höga DC strömmar för att mäta upp jordpotentialen på samtliga ställen i ett ställverk där man har en nedledare till jord. Den höga DC strömmen används bl.a. för att undvika brus, men också för att potentialskillnaderna i nätet ska bli så pass höga att man kan använda sig av traditionella multimettrar snarare än dyrare "Kelvinbryggor". Ett annat motiv som anges är att DC kan användas med ställverket i drift, vilket tydligen inte skulle vara möjligt med AC. Tveksamhet råder kring det. En 50 Hz AC ström och dess övertoner är nog i sig olämplig för mätning pga störnivåer, men en annan frekvens borde i princip fungera utan problem. I princip bör man nog också studera hur spänningarna varierar med strömmens storlek eftersom olinjäriteter i spänningsström karaktäristiken kan vara en indikation på att något är fel.

### 2.1.3 Ytpotentialsbestämning

Zhang et al [13] har en metod som också går ut på att man injicerar strömmar i jordlinjenätet men däremot mäter man ytpotentialen på markytan jämfört med injiceringspunkten. Från den ytpotentialen beräknas läckströmmen ut från ledarna till marken och från dessa beräknas avvikelser från modellen. I denna artikel har dock marken översta lager en mycket låg resistivitet ( $< 100 \Omega$ ) vilket gör att läckströmmen ut ur ledarna kan bli relevanta. En liknande metod har föreslagits av Lu et al [14] och ett exempel från deras simulerade resultat visas i Figur 5.

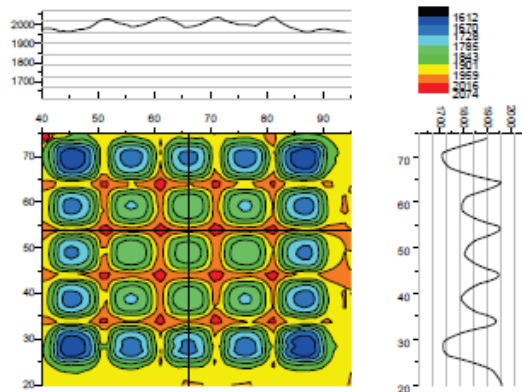


Fig. 11 Contour map of surface potential without faults

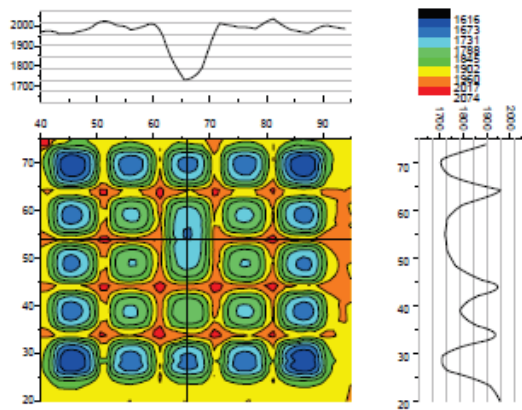
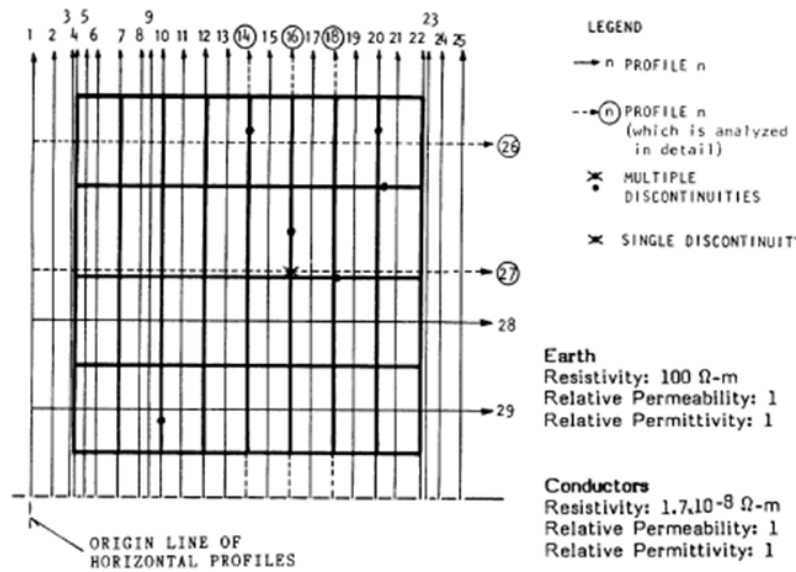


Fig. 12 Contour map of surface potential with fault

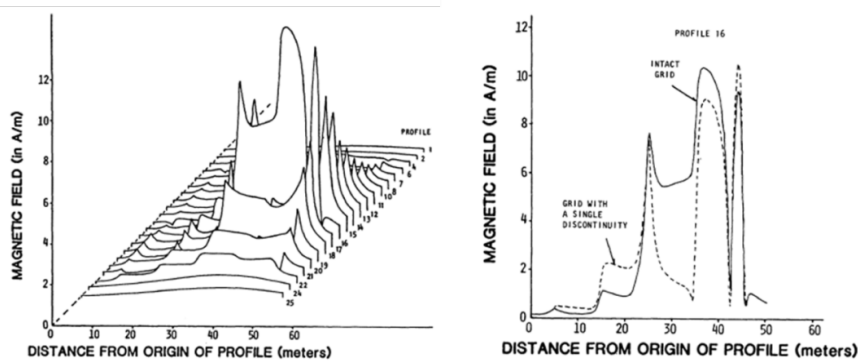
Figur 5 Simulerat resultat representerandes ytpotentialen i ett nät utan och med avbrott. [14]

#### 2.1.4 Magnetfältsmetod

Dawalibi [7] presenterade redan 1986 en artikel hur magnetfältet varierar kring ett jordledningsnät innehållandes avbrott på vissa ledare. Initierade fel på ett jordledningsnät visas i Figur 6 och de erhållna resultaten visas i Figur 7. Resultaten visar på intressanta möjligheter att lokalisera avbrotten genom att betrakta hur magnetfältets intensitet varierar. Idag finns ett flertal varianter på sensorer som kan användas för att plocka upp och mäta magnetfältet, t.ex. 'pick-up' spolar vilka kräver tidsvarierande magnetfält, Hallsensorer och magnetoresistiva sensorer vilka fungerar även för DC.



Figur 6 Jordlinjenät med införda defekter. [7]



Figur 7 Magnetfältets variation kring en jordlinjenät innehållandes avbrott. [7]

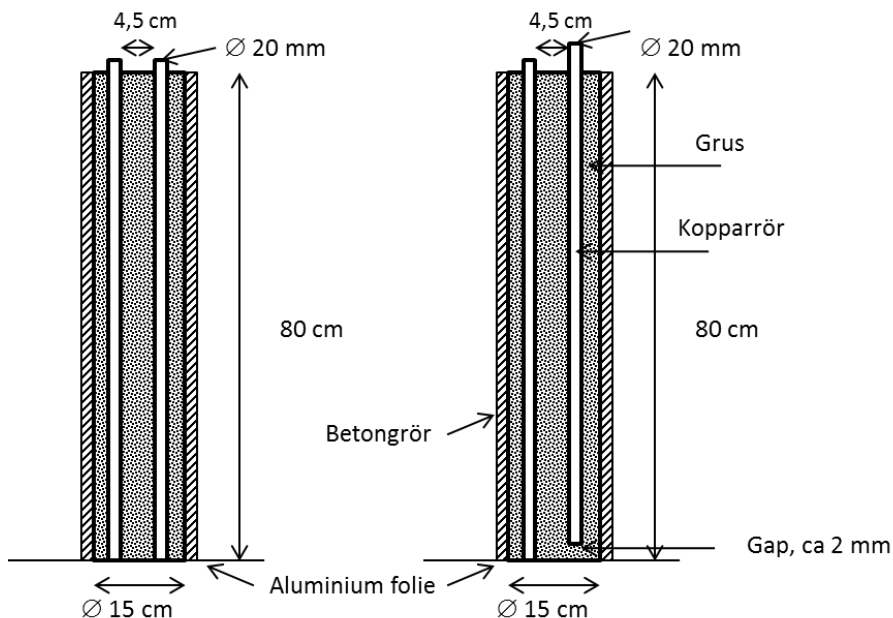
Metoden verkar klart lovande, men det finns inte speciellt många liknande arbeten efter den artikeln.

## 2.2 TRANSIENT ELEKTROMAGNETISK METOD

En relativt ny metod som har provats för att detektera fel i jordlinjenät baseras på två koncentriska platta spolar av olika storlek. [15] Den ena spolen är sändarspole och den andra – mindre spolen – är mottagare. I den ena spolen skickas en signal ut och i den andra tas en signal emot från de inducerade strömmarna som cirkulerar i en maska i jordlinjesystemet. Har maskan ett avbrott så blir den detekterade signalen mycket mindre. Iden är hämtad från geofysikaliska undersökningar som använder sig av metoden för att bestämma egenskaper i marken [16]. Liknande spolar används också i vanliga metalldetektorer. En strömpuls kan appliceras i spolen endera genom att ladda ur en uppladdad kondensator över spolen alternativt köra en likström genom spolen som är parallellkopplad med en kondensator och sedan snabbt bryta bort strömmen från DC-källan. En icke-oscillerande puls kan om nödvändigt åstadkommas genom att anpassa med en resistans i kretsen så att kritisk dämpning erhålls.

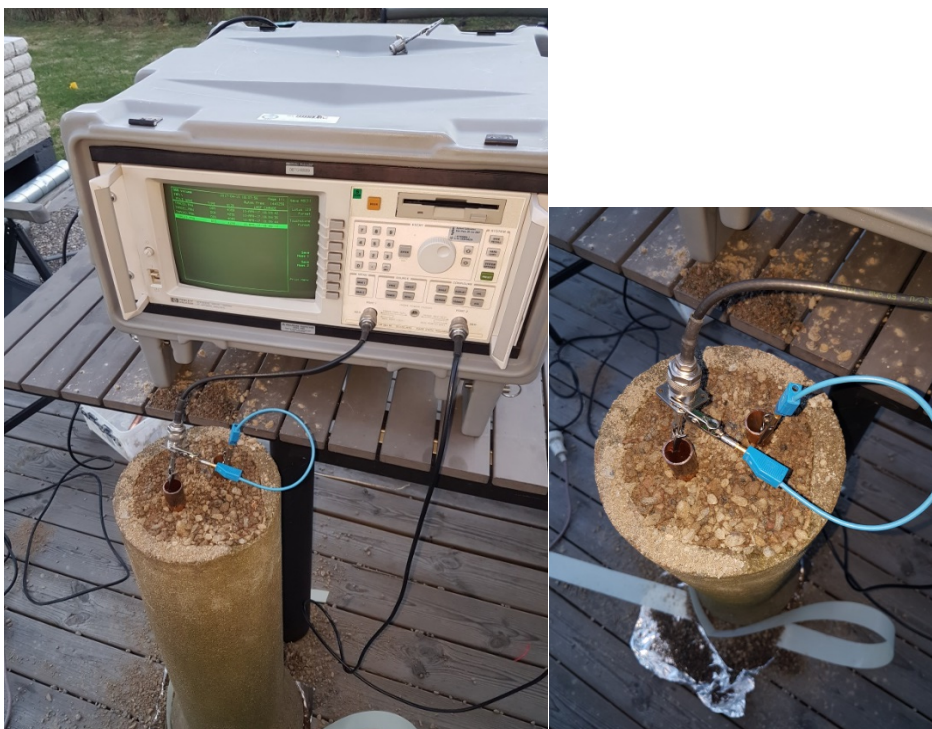
### 3 Mätningar på modellexperiment

Följande modelluppställning, Figur 8, definierades baserat på tillgängligt material och med syfte att efterlikna en situation med jordlinor i mark.



**Figur 8** Mätobjekt för att undersöka nätverksanalysatormetodens möjligheter att detektera fel i en modell av ett jordlinjesystem – i praktiken en modell med kopparledare i mark vilka i det här fallet är kortslutna i änden av en aluminiumfolie. Modellen avser att på ett enkelt sätt beskriva en "ruta" i ett jordlinjenät.

Ett betongrör placerades på en aluminiumfolie varefter två kopparrör (diameter 20 mm och godstjocklek 1 mm) placerades vertikalt på en aluminiumfolie med ett inbördes kortaste avstånd av 4,5 cm, dvs. ca 3 cm mellan varandra kopparröret och betongröret. Betongröret var 80 cm högt och kopparrören stack upp ca 2 cm ovanför det grusfyllda betongröret. Ett foto på uppställningen visas i Figur 9. Nätverksanalysatorn var en HP 8712ES med mätområde 300 kHz – 1300 MHz.

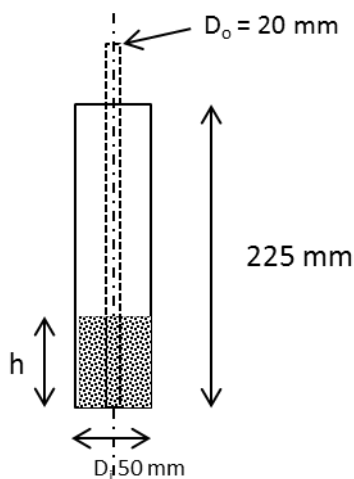


Figur 9 Nätverksanalysatorn inkopplad för mätning av  $S_{11}$  för två parallella rör instängda i grus.

### 3.1 KOMPLETTERANDE DIELEKTRISKA MÄTNINGAR PÅ FYLLNADSMATERIALEN, 100 HZ- 1 MHz

Innan nätverksanalysatormätningarna genomfördes utfördes kompletterande dielektriska mätningar på gruset med en HP 4284 LCR meter för att ta reda på fyllnadsmaterialens permittivitet (dielektricitetskonstant) och konduktivitet. LCR metern kan utföra mätningar i frekvensområdet 20 Hz – 1 MHz. Här användes endast mätningar över 100 Hz då mätfelet vid de lägsta frekvenserna ofta är höga.

Mätuppställningen utgjordes av två koncentriska kopparrör enligt Figur 10 och fotografiet i Figur 11 nedan.



Figur 10 Enkel koaxial mätcell för uppmätning av grusets dielektriska egenskaper.



Figur 11 Mätcell inkopplad för mätning av dielektriska egenskaper ( $C_p - R_p$ ) för grus och jord.

Den koaxiala mätuppställningen för att mäta de dielektriska egenskaperna hos fyllnadsmaterialet visas i Figur 10 och 11 ovan. Elektroden bestod av två koncentriska kopparrör där det yttre röret hade en innerdiameter av 50 mm och det inre röret en ytterdiameter av 20 mm. Denna uppställning gav en tomgångskapacitans på 14 pF vilket också bekräftades av mätningen.

LCR metern klarade dock inte av att mäta när hela provcellen var fylld med grus/sand/jord utan endast till en höjd  $h$ .

För fallet grus erhöles följande värden (Tabell 1) kapacitans-resistans ( $C_p - R_p$ ) med en gruspelare av höjden  $h = 12,7$  cm. I  $R_p$  värdet ingår i princip en ekvivalent representation av de dielektriska polarisationsförlusterna, men dessa antas i sammanhanget vara små i jämförelse med de resistiva förlusterna.

Tabell 1 Resistans- och kapacitansvärden för mätcell med grus uppmätta med LCR analysator.

| f[Hz]   | $C_p$ [nF] | $R_p$ [Ohm] |
|---------|------------|-------------|
| 100     | 320        | 1600        |
| 200     | 116        | 1300        |
| 500     | 33         | 1200        |
| 1000    | 13.8       | 1230        |
| 2000    | 6.3        | 1200        |
| 5000    | 2.4        | 1160        |
| 10000   | 1.17       | 1130        |
| 20000   | 0.57       | 1100        |
| 50000   | 0.24       | 1060        |
| 100000  | 0.15       | 1040        |
| 200000  | 0.13       | 1300        |
| 500000  | 0.21       | 1050        |
| 1000000 | 0.91       | 940         |

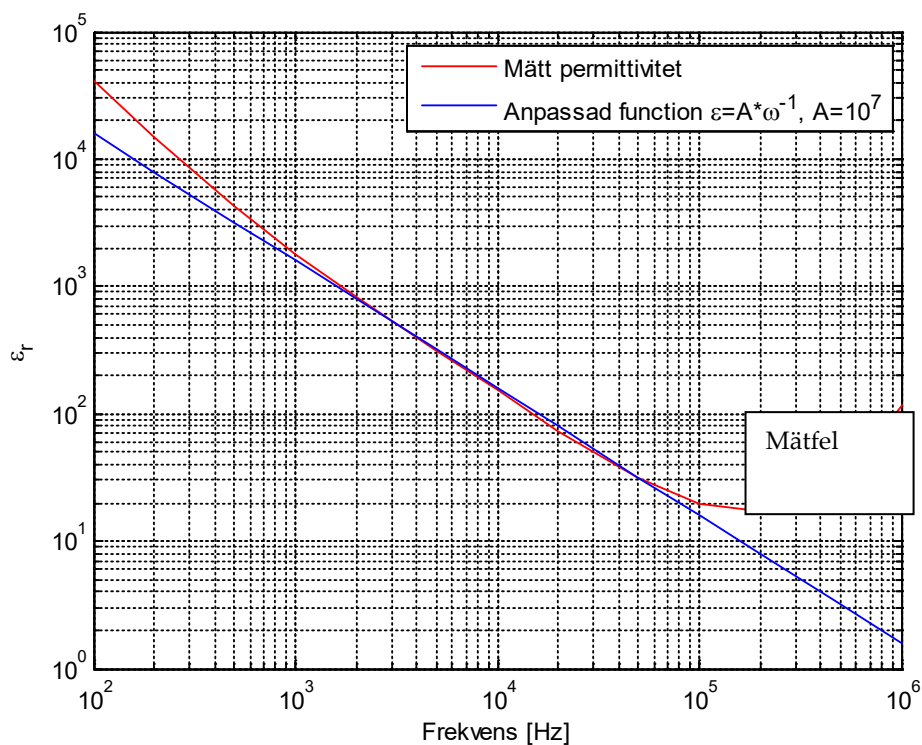
Dessa värden kan omräknas till dielektricitetskonstant (relativ permittivitet),  $\epsilon_r$ , och konduktivitet  $\sigma$  enligt ekvationerna (1) – (3) nedan och resultaten har plottats i Figur 12 och Figur 13.

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon_0 h}{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}, \quad (1)$$

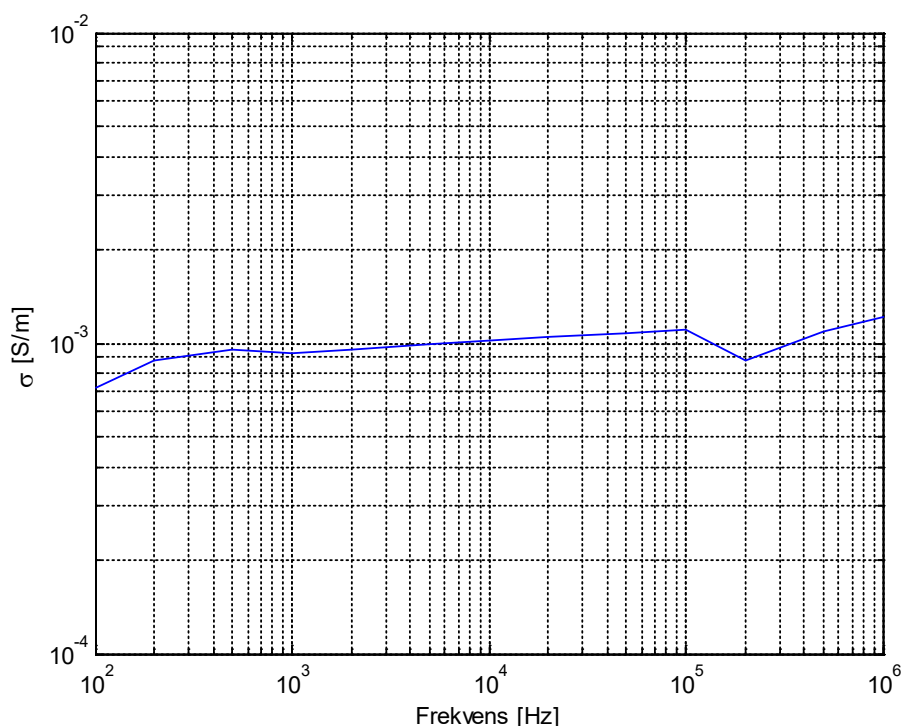
$$\epsilon_r = \frac{C_p}{C_0}, \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{\epsilon_0}{R_p C_0} = \frac{1}{R_p} \frac{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2\pi h}, \quad (3)$$

där  $C_0$  är testcellens geometriska kapacitans.



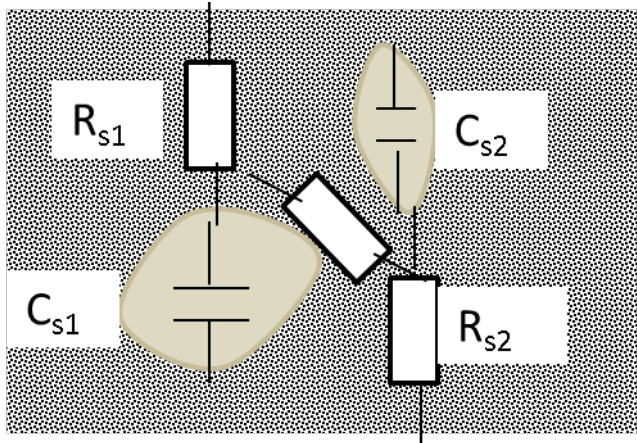
Figur 12 Relativa permittiviteten (dielektricitetskonstanten) som funktion av frekvens.



Figur 13 Konduktiviteten som funktion av frekvens.

Konduktiviteten är hög och konstant och ligger kring  $\sigma = 10^{-3} \text{ S/m}$  vilket motsvarar en resistivitet på  $\rho = 1000 \text{ }\Omega\text{m}$  vilket är fullt rimligt för många bergarter [4].

Dielektricitetskonstanten är något missvisande hög och avspeglar det komplicerade förhållandet för ett fyllt material där mer isolerande stenar har blandats med mer ledande sand/grus. Ett sådant förhållande uppvisar en så kallad Maxwell-Wagners-Sillars (MWS) polarisation som i sin enklaste form kan förklaras med en  $R_s$ - $C_s$  modell där  $R_s$  representerar en ledande fas i serie med en isolerande kapacitans -  $C_s$ . Fenomenet illustreras i Figur 14 nedan där två isolerande stenar bidrar till kapacitans effekten medan de omkringliggande materialen representerar ett mer ledande material. Den totala effekten blir parallella strömbanor där strömmen kan följa såväl enbart resistanserna (bidrar till  $R_p$ ) såväl som uppladdning av  $C_s$  (bidrar till  $C_p$  men även till en frekvensberoende del i  $R_p$ , som i detta fall överskuggas av de ledande delarna).



Figur 14 Ekvivalent kretsmodell som beskriver olika vägar för strömmen genom ett kompositmaterial bestående av delar med väsentligt skild ledningsförmåga (grus, sand, etc.)

En MWS-modell ger, när den betraktas som en kapacitans, en frekvensberoende och komplex kapacitansen enligt

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{j\omega\tilde{C}_{MWS}} &= R_s + \frac{1}{j\omega C_s} \Rightarrow \\
 \tilde{C}_{MWS}(\omega) &= C'_{MWS}(\omega) - jC''_{MWS}(\omega) = \frac{1}{j\omega\left(R_s + \frac{1}{j\omega C_s}\right)} = \\
 &= \frac{C_s}{1 + j\omega R_s C_s} = \frac{C_s}{1 + (\omega R_s C_s)^2} - j \frac{\omega R_s C_s^2}{1 + (\omega R_s C_s)^2} = \left\{ \omega_s = \frac{1}{R_s C_s} \right\} = \\
 &= \frac{C_s}{1 + (\omega/\omega_s)^2} - j \frac{C_s \omega/\omega_s}{1 + (\omega/\omega_s)^2}
 \end{aligned} \tag{4}$$

I detta förhållande skulle realdelen uppvisa ett frekvensberoende som går som  $\omega^{-2}$  då  $\omega \gg \omega_s$ .

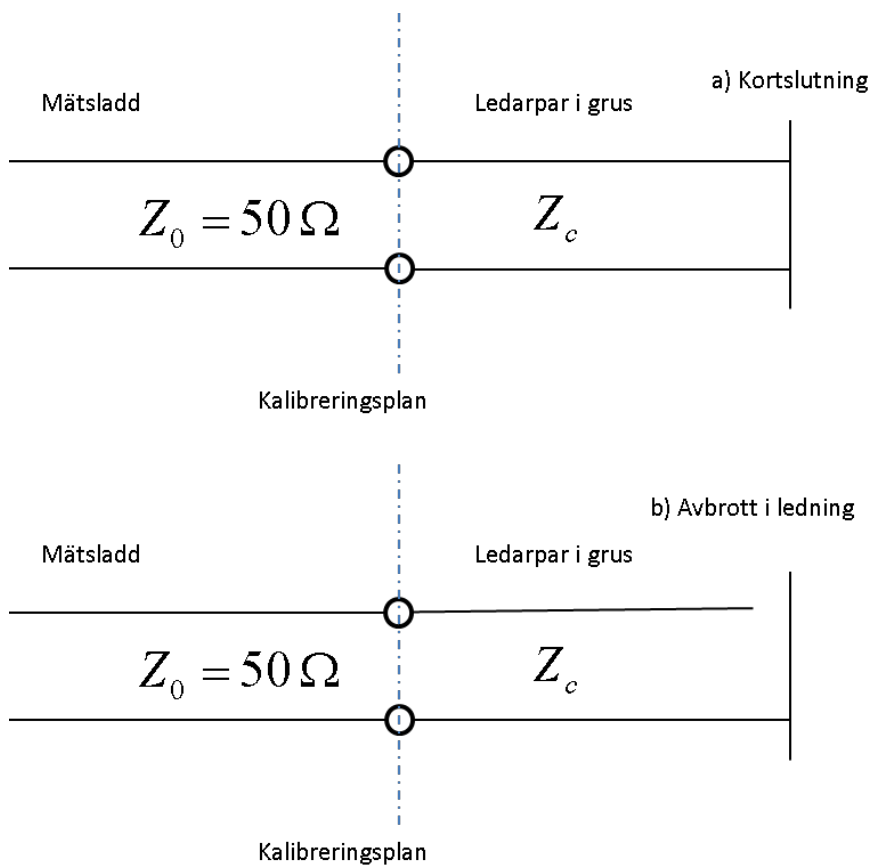
I många fall är exponenten "-2" inte just "-2" utan lägre – i det här fallet "-1" vilket i sig är intressant.

Avsikten är inte att gräva djupare i detta utan att snarare konstatera att den "ekvivalenta" permittiviteten ligger kring ~10 eller lägre när frekvensen ligger över 100 kHz. Den nätverksanalysator som används i de senare experimenten börjar sitt spektrum vid 300 kHz och för att kunna analysera de data som den ger så behöver vi en bra uppskattning på bland annat permittiviteten och konduktiviteten i det frekvensområdet. LCR-metern ger en indikation på storleksordningen för dessa, dvs.  $\epsilon_r \leq 10$  och  $\sigma \sim 10^{-3}$  S/m.

### 3.2 MÄTNINGAR MED NÄTVERKSANALYSATOR PÅ LEDNINGSPAR INBÄDDAT I GRUS – KORTSLUTEN ÄNDE

Mätupställningen för geometrin i Figur 8 och Figur 9 användes för att utföra mätningar av spridningsparametern  $S_{11}$ . I det här fallet valdes en enportsmätning för att en tvåportsmätning i ett riktigt jordlinjenät skulle kräva att man kan ansluta längs två olika punkter längs en jordlina i nätet vilket antagligen skulle innebära att man behöver gräva i ställverket. En tvåportsmätning är normalt mycket mer noggrann och ger då fyra komplexvärda (fas och amplitud) storheter:  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{22}$ ,  $S_{21}$ ; där  $S_{11} = S_{22}$  och  $S_{12} = S_{21}$  vid symmetrisk tvåport, vilket dock inte är självklart i en reell situation då markens sammansättning kan variera pga. fukthalter, rör, kablar etc.

I det här fallet har uppställningen en geometri som avser representera modellen för en elektromagnetisk transmissionsledning enligt modellen i Figur 15.



Figur 15 Transmissionsledningsmodell av mätupställningen.

Mätsystemet har impedansen  $Z_0 = 50 \Omega$ . I det här fallet så kalibreras mätsystemet i mätsladdarnas ändar, i det här fallet har det gjorts med "THROUGH", "OPEN", "SHORT", "LOAD" kalibrering av båda portarna trots att bara den ena porten användes. Det betyder att mätningen har korrigerats för den koaxiala mätsladdens längd bland annat.

Spridningsparametern  $S_{11}$  kan härledas ur de ingående ledningssegmenten och lasternas vågimpedanser eller diskreta impedanser ifall det avser en diskret komponent som t.ex. kortslutningen i ledningsänden.

Impedansen sett åt höger från kalibreringsplanet definieras av,

$$Z_{in} = Z_c \frac{Z_T + Z_c \tanh(\gamma d)}{Z_c + Z_T \tanh(\gamma d)} \quad (5)$$

där

$$Z_c = \sqrt{\frac{r + j\omega l}{g + j\omega c}} \quad (6)$$

är ledningens karaktäristiska impedans eller komplexa vågimpedans i frekvensdomäns representation. Om ledningen är förlustfri, ( $r = g = 0$ ), så är denna impedans reell och lika med  $Z_c = \sqrt{\frac{l}{c}}$ , där  $l$  och  $c$  är ledningens induktans respektive kapacitans per längdenhet.

I analysen används nu en förenklad modell baserad på en tvåtrådsledning i oändligt homogen omgivning. Den förenklingen är approximativt korrekt då det elektriska fältet i huvudsak befinner sig mellan ledarna och magnetfältet utanför en tvåtrådsledning avklingar relativt snabbt.

I högfrekvenssammanhang kan man försumma magnetfältet (induktansen) inuti ledarna då detta snabbt försvinner pga. motriktat magnetfält orsakat av virvelströmmar. I detta fall består ledarna dessutom av tunna rör vilket förbättrar den approximationen.

För en tvåtrådsledning hittar man följande uttryck [17]:

$$l = \frac{\mu_r \mu_0}{\pi} \cosh^{-1}\left(\frac{D}{2a}\right) [\text{H/m}] \quad (7)$$

$$c = \frac{\pi \epsilon_r \epsilon_0}{\cosh^{-1}\left(\frac{D}{2a}\right)} [\text{F/m}] \quad (8)$$

Om ledningen nu var luftfylld så skulle den ha en vågimpedans på

$$Z_c = \sqrt{\frac{l}{c}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \frac{1}{\pi} \cdot \cosh^{-1}\left(\frac{D}{2a}\right) = 377 \cdot \frac{1}{\pi} \cosh^{-1}\left(\frac{0.05}{2 \cdot 0.01}\right) = 188 \, \Omega \quad (9)$$

En förlustbehäftad ledning har ett mer komplicerat uppförande.

Resistanstermen får uttrycket,

$$r = \frac{r_s}{\pi a} = \frac{\sqrt{\pi f \mu_{rcu} \mu_0 / \sigma_{cu}}}{\pi a} [\Omega / m] \quad (10)$$

Här avses relativa permeabiliteten och konduktiviteten för koppar ( $\mu_{rcu} = 1$ ,  $\sigma_{cu} = 5,96 \cdot 10^7$  S/m).

Shunt- eller läck-konduktansen genom "isolationen" = gruset fås som

$$g = \frac{\pi \sigma_{soil}}{\cosh^{-1}\left(\frac{D}{2a}\right)} [S / m], \quad (11)$$

där  $\sigma_{soil} \sim 10^{-3}$  S/m är grusets (jordens, eng. soil) konduktivitet.

Ledningen har också en propageringskonstant,

$$\gamma = \sqrt{(r + j\omega l) \cdot (g + j\omega c)} \quad (12)$$

Om ledningen är förlustfri,  $r = g = 0$ , så är propageringskonstanten

$$\gamma = j\omega\sqrt{lc} = j\omega\sqrt{\varepsilon_r}\sqrt{\varepsilon_0\mu_0} = j\frac{\omega}{v_0}\sqrt{\varepsilon_r} = \{Om\ luft\} = j\frac{\omega}{v_0} \quad (13)$$

där  $v_0 = 3 \cdot 10^8$  m/s, dvs. elektromagnetiska vågors hastighet i vakuum/luft.

Termineringsimpedansen i detta fall är noll då det är en kortslutning med  $Z_t = 0$ , dvs.,

$$Z_{in} = Z_c \tanh(\gamma d) \quad (14)$$

Spridningsparametern  $S_{11}$  fås som en reflexionskoefficient i övergången mellan mät kabel och provobjekt, dvs.,

$$S_{11} = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} = \frac{Z_c \tanh(\gamma d) - Z_0}{Z_c \tanh(\gamma d) + Z_0} \quad (15)$$

Om detta nu vore en kortsluten förlustfri tvåtrådsledning så skulle uttrycket ändras till

$$S_{11} = \frac{Z_c \tanh(j\frac{\omega}{v_0}\sqrt{\varepsilon_r}d) - Z_0}{Z_c \tanh(j\frac{\omega}{v_0}\sqrt{\varepsilon_r}d) + Z_0} = \frac{jZ_c \tan(\frac{\omega}{v_0}\sqrt{\varepsilon_r}d) - Z_0}{jZ_c \tan(\frac{\omega}{v_0}\sqrt{\varepsilon_r}d) + Z_0} \quad (16)$$

På motsvarande sätt kan man hitta ett förenklat uttryck för en öppen ledning, dvs för  $Z_T = \infty$ , (idealiskt).

Figur 16 nedan visar real och imaginärdel för frekvensgången i  $S_{11}$  hos en öppen respektive kortsluten tvåtrådsledning med samma dimensioner som i detta fall, men med förlustfria egenskaper.

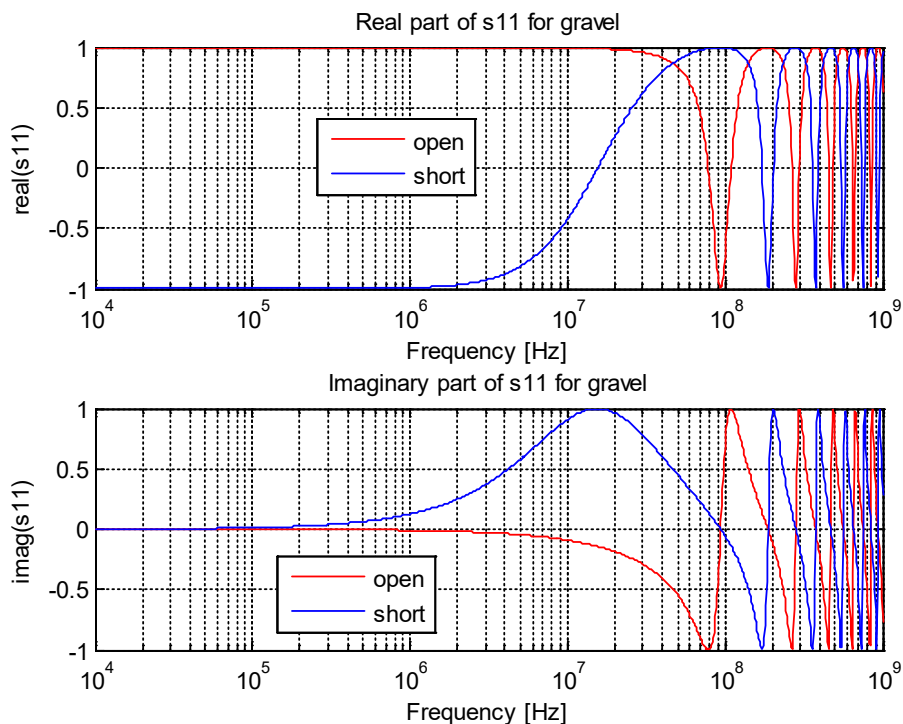
Den väsentliga skillnaden är vid låga frekvenser där öppen ledning har realdelen 1 medan kortsluten ledning har realdelen -1. I praktiken räcker ju en vanlig förbindelseprovare (DC) för att se om man har en öppen eller kortsluten krets så detta är ingen överraskning. Vid högre frekvenser beter sig öppen och kortsluten ledning relativt lika, med den skillnaden att egenskaperna förskjuts till olika frekvenser (våglängder) beroende på om det är en öppen eller kortsluten ledning, men principen är att en terminerad ledning (öppen såväl som kortsluten) alternerar mellan induktiv och kapacitiv impedanskaraktär beroende på frekvensen. Metodens styrka ligger dock i att man kan bestämma t.ex. avståndet till öppen eller kortsluten krets baserat på vid vilka frekvenser som  $S_{11}$  har sina nollställen.

Nollställena för en kortsluten ledning fås vid de frekvenser som ges av ekvation (17),

$$Z_c \tan\left(\frac{\omega}{v_0} \sqrt{\epsilon_r} d\right) - Z_0 = 0 \Rightarrow \frac{\omega_{00}}{v_0} \sqrt{\epsilon_r} d + m\pi = \arctan\left(\frac{Z_0}{Z_c}\right) \Rightarrow$$

$$\omega_{00n} = \frac{v_0}{\sqrt{\epsilon_r} d} \left( \arctan\left(\frac{Z_0}{Z_c}\right) + n\pi \right) \quad (17)$$

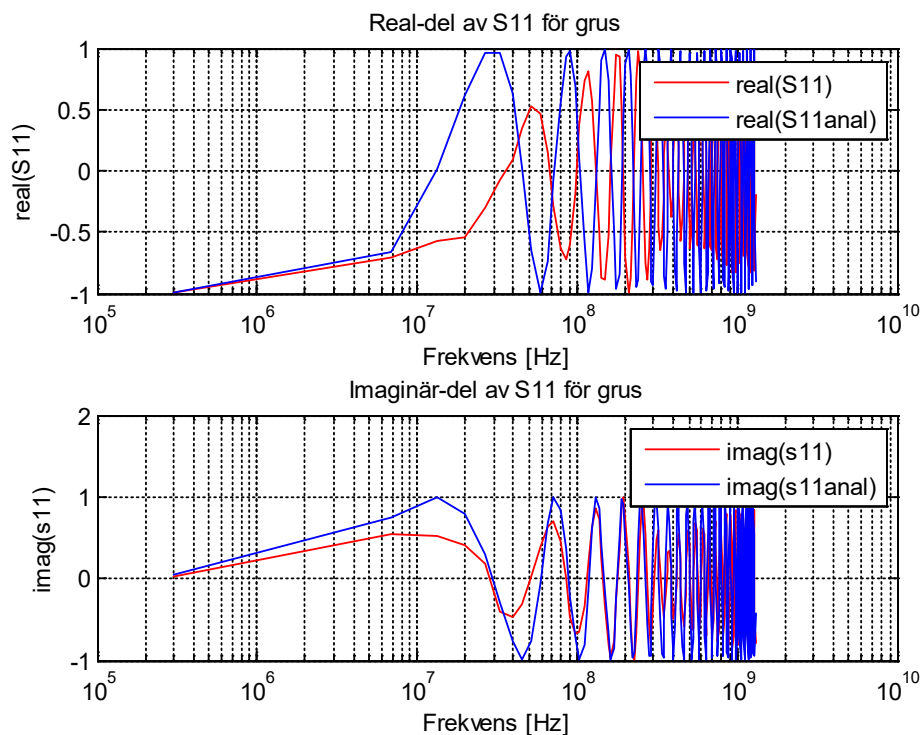
Man ser här att nollställenas position bestäms av flera parametrar, bland annat ledningens längd ( $d$ ), dielektricitetsstalet ( $\epsilon_r$ ) (vilken kan ändras med frekvensen pga. dispersion) samt den karaktäristiska impedansen som beror av geometrin (noggrannheten i  $D$  och  $a$ ) samt på dielektricitetsstalet,  $\epsilon_r$ .



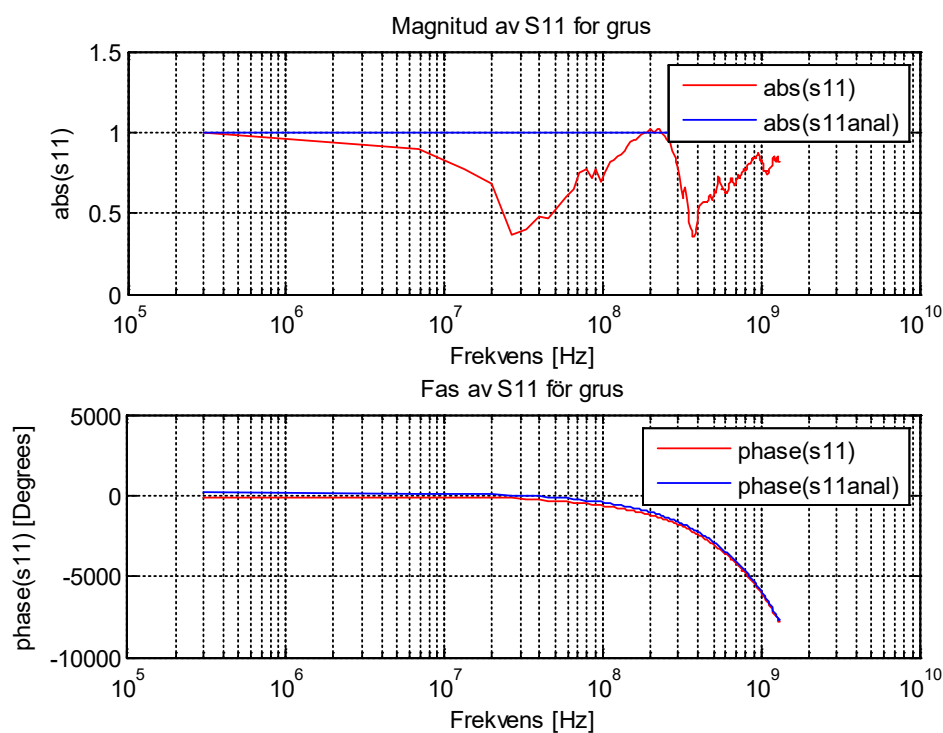
Figur 16 Real- och imaginärdel för  $S_{11}$  för öppen respektive kortsluten ände.

Vid analysen av ledningen i gruset är det därför naturligt att anta att geometrin är väldefinierad, dvs.  $d$ ,  $D$  och  $a$  antas exakt kända. Vi börjar därför med att titta på hur  $\varepsilon_r$  kan anpassas till mätningarna för att få så god överensstämmelse som möjligt mellan mätning och data.

Figur 17 visar kurvorna för real- och imaginärdel i  $S_{11}$ . Precis som i Figur 16 syns det tydligt vid låga frekvenser att det ligger en kortslutning framåt längs ledningen. Det är inte helt lätt att bara anpassa in  $\varepsilon_r$  men ett  $\varepsilon_r = 10$  ger en bra fasgång på  $S_{11}$  i Figur 17. Nollställena stämmer bra för imaginär delen av  $S_{11}$  men inte så bra i realdelen, möjlig orsak är att permittiviteten eller konduktiviteten varierar väsentligt med frekvensen i mätområdet. Enligt [18] är dock frekvensberoendet hos "jord" dock inte så stark i detta område. En annan möjlig orsak är att då röret är vertikalt placerat så har gruset packats tätare i botten än i toppen pga överliggande grusmassa, vilket skulle kunna påverka då transmissionsledningen får inhomogena egenskaper.



Figur 17 a) Real- och imaginärdel för  $S_{11}$  för kortsluten ledning fylld med grus. Blå kurva är anpassning med förlustfria ledningsparametrar och  $\varepsilon_r = 10$ .



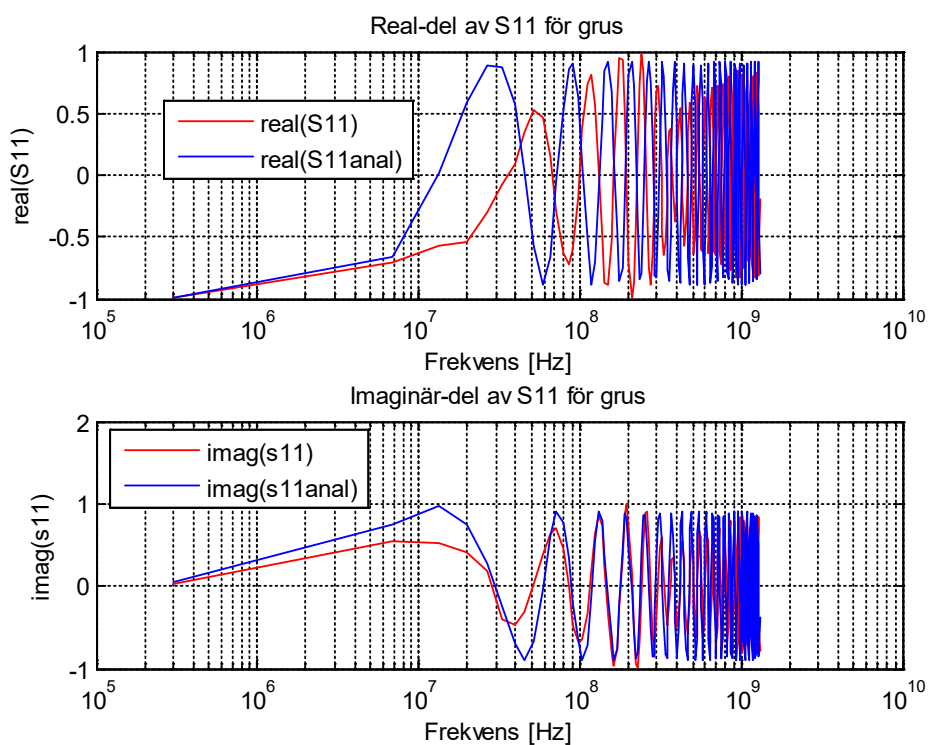
Figur 17 b) Magnitud och fas av  $S_{11}$  för kortsluten ledning fylld med grus. Blå kurva är anpassning med förlustfria ledningsparametrar och  $\varepsilon_r = 10$ .

### 3.2.1 Inverkan av ökade ledningsförluster - $r$

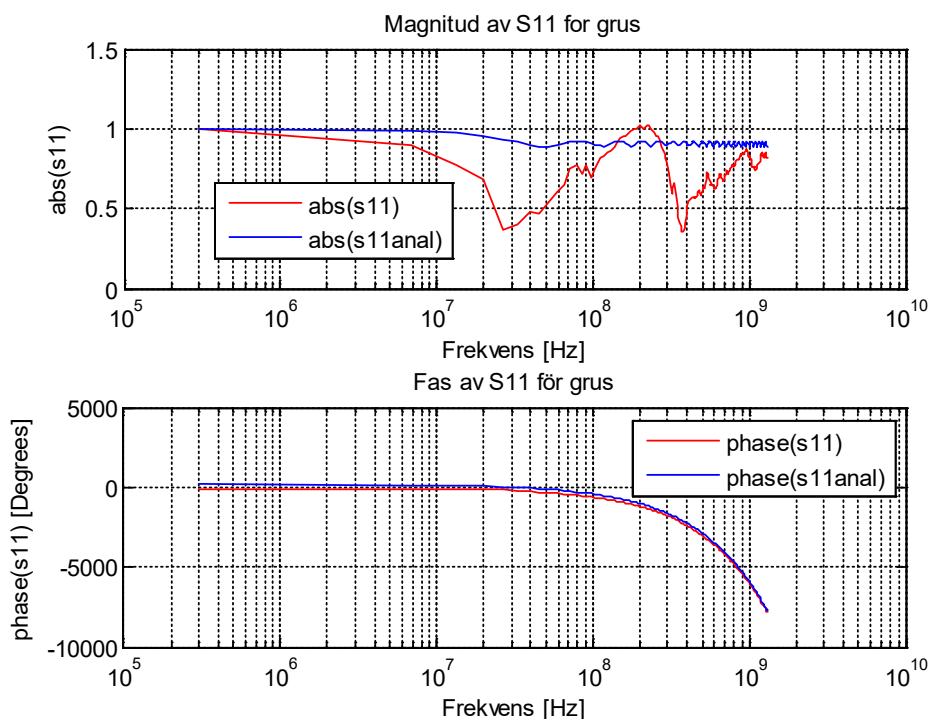
Inverkan av ledningsförlusterna i form av skineffekten är mycket liten på en så pass kort ledning som denna. För att få en märkbar skillnad framförallt på amplituden hos  $S_{11}$  så krävs åtminstone en ledningsförmåga som är hundra gånger sämre än koppars. Resultaten av detta indikerar att någon form av inverkan av korrosion inte är meningsfull att studera på en modell som denna.

### 3.2.2 Inverkan av markkonduktiviteten - $\sigma$

Ett initialt värde att börja analysen med är att ansätta den uppmätta konduktiviteten  $\sigma = 10^{-3} \text{ S/m}$ .

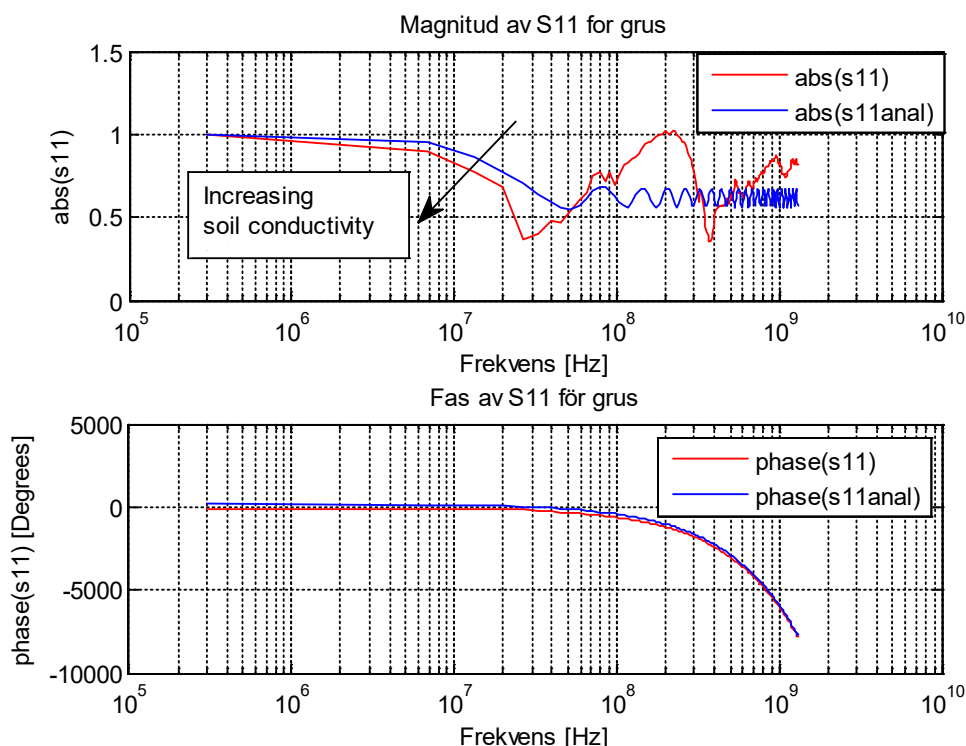


Figur 18 a) Real- och imaginärdel för  $S_{11}$  för kortsluten ledning fylld med grus. Blå kurva är anpassning med förlustfria ledningsparametrar och  $\epsilon_r = 10$ ,  $\sigma = 10^{-3} \text{ S/m}$ .



Figur 18 b) Magnitud- och fas av  $S_{11}$  för kortsluten ledning fylld med grus. Blå kurva är anpassning med förlustfria ledningsparametrar och  $\epsilon_r = 10$ ,  $\sigma = 10^{-3}$  S/m.

Man ser av resultatet att införandet av konduktiviteten i gruset beter sig på ett i princip korrekt sätt. Om man ansätter högre förluster så kommer det att leda till något bättre anpassning i frekvensområdet kring 10 MHz, se Figur 19 nedan för fallet  $\sigma = 5 \cdot 10^{-3}$  S/m. Vid högre frekvenser är skillnaden betydande, vilket kan ha samma orsaker som diskuterats ovan, dvs. avsaknaden av frekvensberoende i permittivitet och tätare packat grus i botten.



Figur 19 Real- och imaginärdel för  $S_{11}$  för kortsluten ledning fylld med grus. Blå kurva är anpassning med förlustfria ledningsparametrar och  $\varepsilon_r = 10$ ,  $\sigma = 5 \cdot 10^{-3}$  S/m.

### 3.2.3 Slutsatser – ledning med kortsluten ände

Beteendet hos  $S_{11}$  vid frekvenser upp till 10 MHz bekräftar att det finns en kortslutning på ledningen. Från den övriga karaktärstiken kan man i princip verifiera och skatta övriga parametrar som inverkan av variationer i geometrin längs ledningen, dvs.  $d$ ,  $D$ ,  $a$  samt de ingående materialparametrarna.

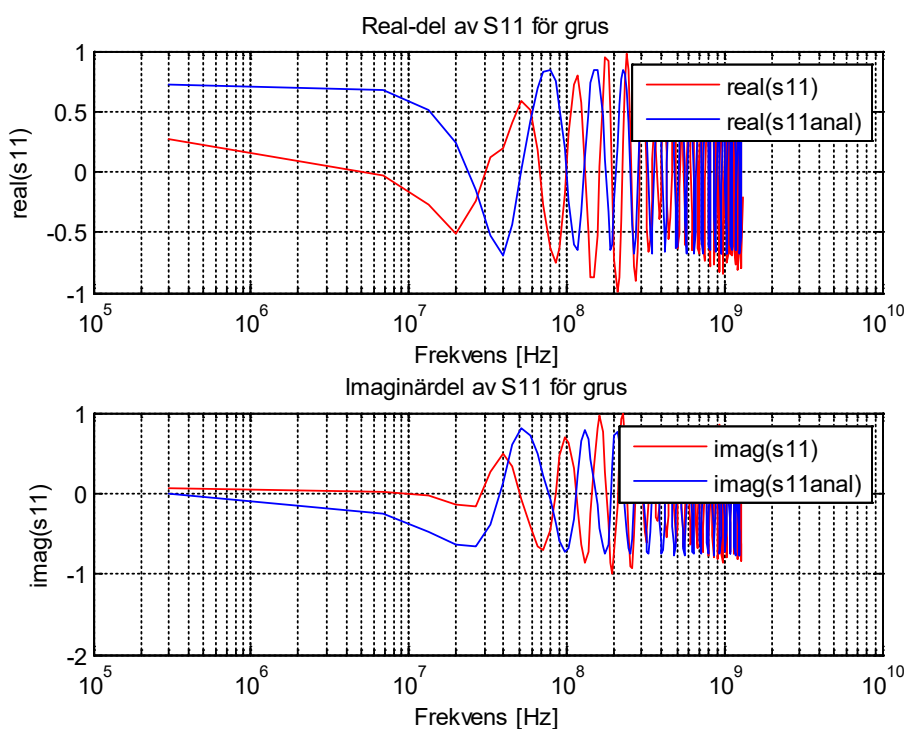
Analysen har enbart utförts med en förenklad beskrivning av gruset, dvs. konstant (frekvensoberoende) parametrar, dielektricitets-konstant och konduktivitet.

Dielektricitetskonstanten och konduktiviteten hos den omkringliggande marken har en väsentlig inverkan på resultatet och behöver modelleras mer noggrant för att erhålla en bättre överensstämmelse mellan mätning och modell.

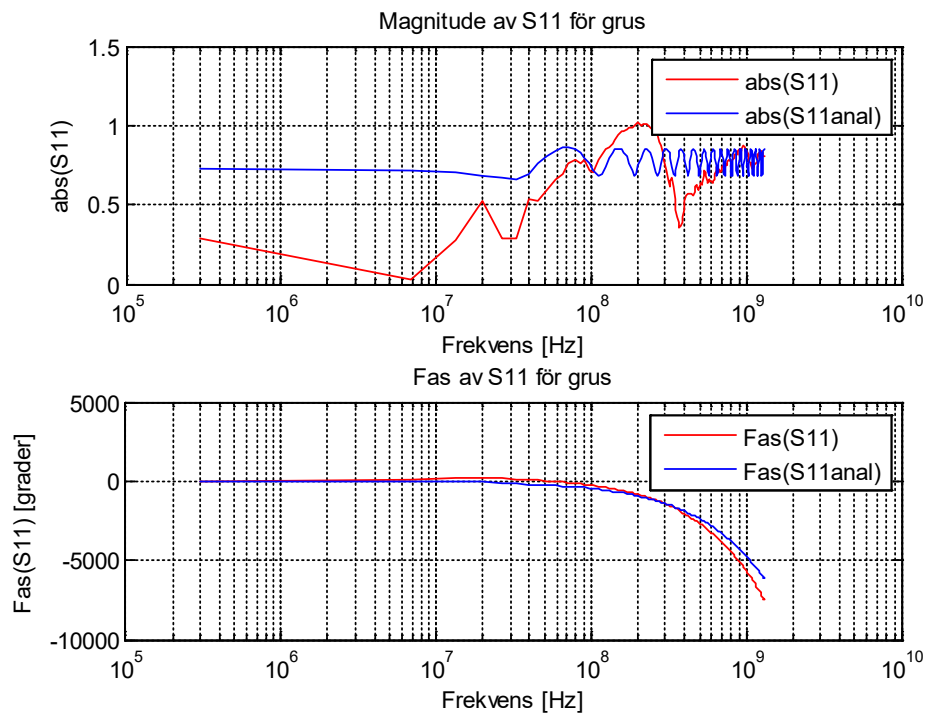
Den analys som har utförts är för grov för att korrekt kunna beskriva alla detaljer av  $S_{11}$ . Avsikten är dock att utreda möjligheterna för diagnos av jordlinjesystem. Svaret är då att: ja man kan verifiera att nätet är slutet, dvs. utan avbrott, men det kan man dock också göra med en enkel förbindelseprovare (DC). Dock finns mer information i  $S_{11}$ , men tolkningen kommer att kompliceras av grusets komplexa dielektriska egenskaper.

### 3.3 MÄTNINGAR MED NÄTVERKSANALYSATOR PÅ LEDNINGSPAR INBÄDDAT I GRUS – AVBROTT I ÄNDEN

Mätresultaten och en anpassad modell med ( $Z_T = \infty$ ) för modellen med ett infört kort avbrott (~2 mm) mellan ledaren och kortslutningen visas i Figur 16 nedan.



Figur 20 a) Real- och imaginär del för  $S_{11}$  för avbruten ledning fylld med grus. Blå kurva är anpassning med förlustfria ledningsparametrar och  $\epsilon_r = 10$ ,  $\sigma = 10^{-3}$  S/m,  $Z_T = \infty$ .

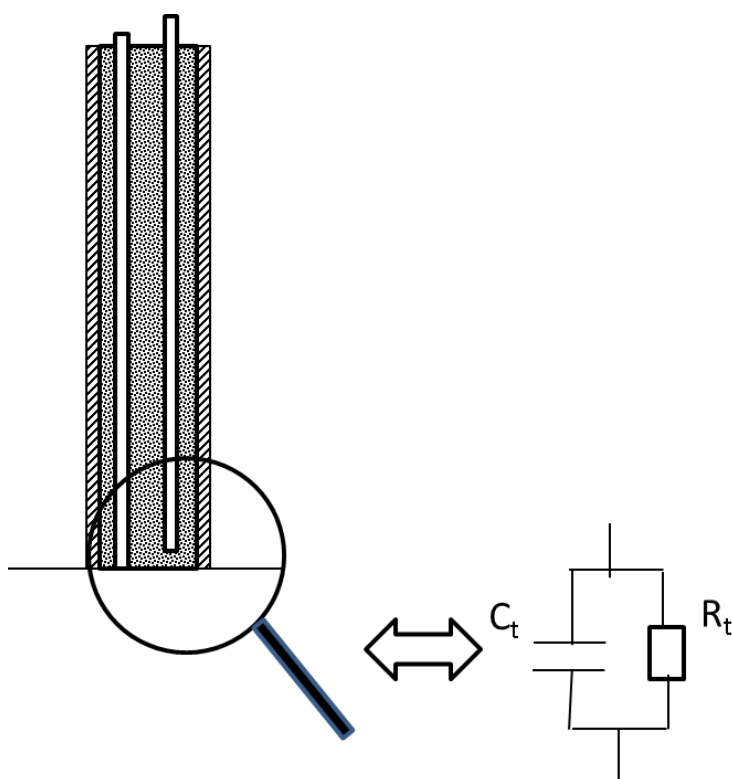


Figur 20 b) Magnitud och fas för  $S_{11}$  för avbruten ledning fylld med grus. Blå kurva är anpassning med förlustfria ledningsparametrar och  $\epsilon_r = 10$ ,  $\sigma = 10^{-3}$  S/m,  $Z_T = \infty$ .

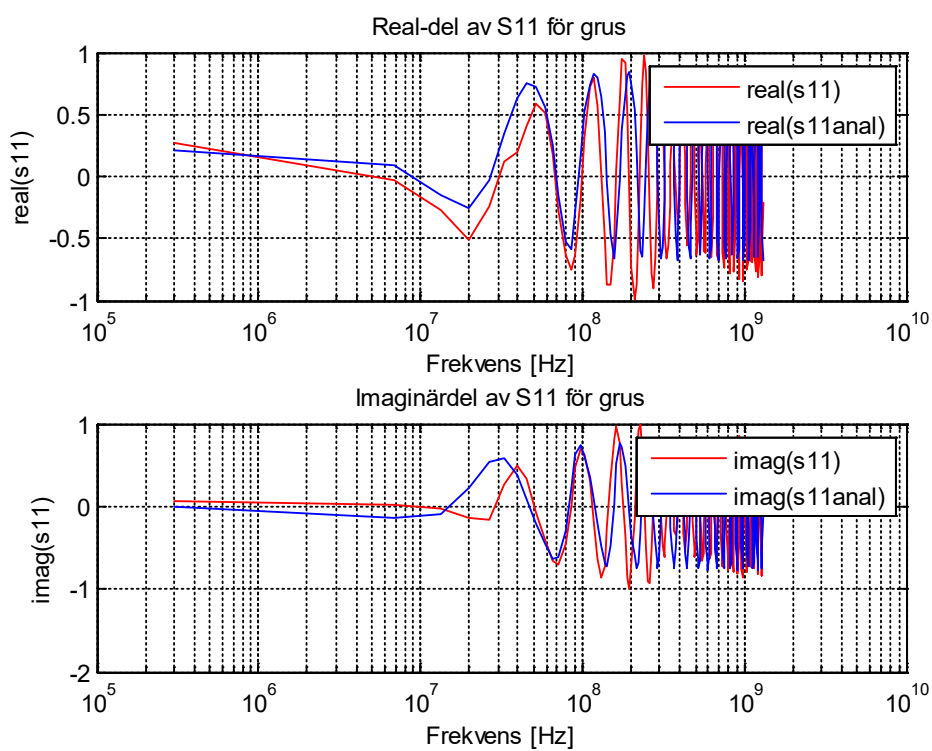
### 3.3.1 Avbrottet i änden där $Z_T = \infty$ ersatts med en anpassad komplex impedans.

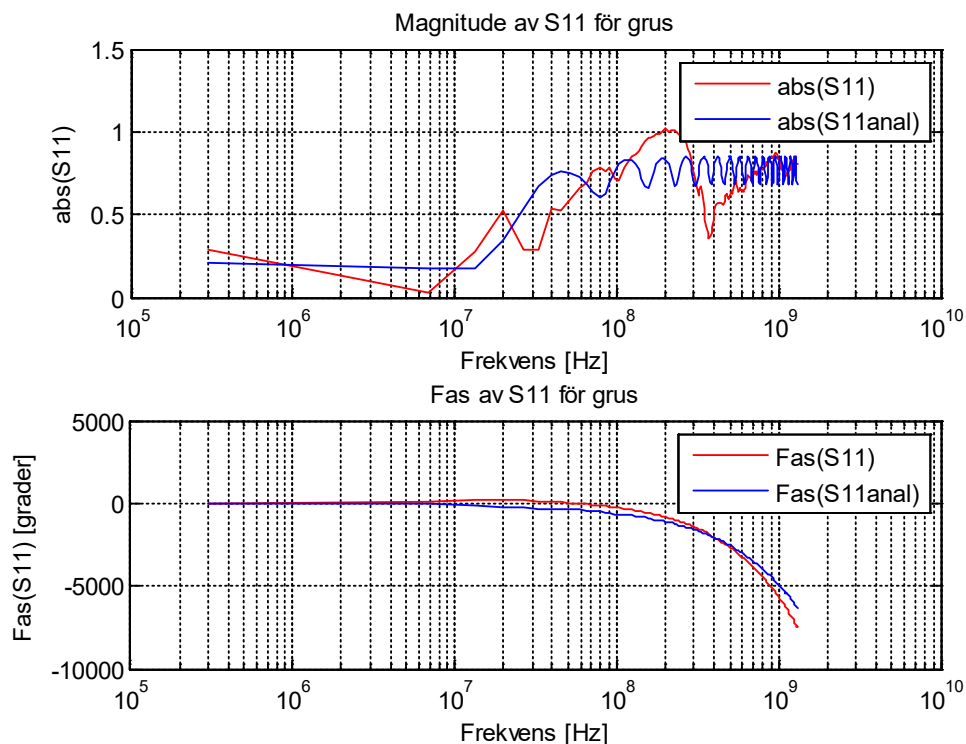
Ett avbrott längs med ledningen (mot kortslutningen till) ger inte en uppenbar överensstämmelse med modellen ( $Z_T = \infty$ ). En klar förbättring fås om man istället inser att ett litet avbrott på ca 1-2 mm inte har en försumbar resistans eller kapacitans.

En skattning baserad på ett gap  $\sim 1$  mm och en tvärsnittsarea av storleksordningen några  $\text{cm}^2$  motiverar följande (grova) resistiva-kapacitiva modell för avbrottet enligt Figur 21, med värden på  $C_t=100$  pF,  $R_t=100$  Ohm. Resultatet visas i Figur 22.



Figur 21 Modellering av avbrottet med enkel  $C_t/R_t$ -krets.





Figur 22 Inverkan på  $S_{11}$  när avbrottet med modelleras med  $C_t=100$  pF,  $R_t=100$  Ohm.

### 3.3.2 Slutsatser – ledning med avbrott i änden

Ett avbrott i en ledare kan detekteras i  $S_{11}$ . Vid höga frekvenser kopplar dock en del av signalen över avbrottet via en ekvivalent  $C_t/R_t$  vilket i och för sig ger en viss insikt i avbrottets karaktär.

## 4 Slutsatser

Den inledande litteraturstudien påvisar att det finns en del litteratur och metoder kring diagnostik av jordlinjenät som har potentialen att påvisa avbrott i ledare och möjligen omfattande korrodering.

En mätuppställning har utvecklats för att undersöka tillämpbarheten av högfrekventa mätningar i frekvensområdet 300 kHz – 1300 MHz med en nätverksanalysator. En sådan metod förutsätter galvanisk anslutning till jordlinjenätet.

Ett modellexperiment har genomförts vilket demonstrerar en situation som avser efterlikna jordlinor inbäddade i ett lager med grus. Mätningar har utförts med kortslutning för att efterlikna en maska i jordlinjenätet och med ett avbrott i en av ledarna.

Resultaten visar att metoden är tillämpbar och att avbrott kan detekteras (avbrott kan dock detekteras mycket enklare med en vanlig förbindelseprovare för enkla fall som detta). Metoden har dock sina fördelar i och med att avståndet till avbrott kan beräknas utifrån en modell. Ett framtida arbete kan vara att undersöka ett mera fullskaligt försök, t.ex. med en utrullad plåt enligt förslaget i Figur 3. Dielektricitetskonstanten och konduktiviteten hos den omkringliggande marken har en väsentlig inverkan på resultatet. En hyfsad överensstämmelse mellan mätning och modell kan erhållas om grusets dielektricitetskonstant och konduktivitet ligger kring 10 respektive  $10^{-3}$  S/m vilket är värden som är rimliga enligt litteraturen [4].

Den generella slutsatsen är att en nätverksanalysatormetod nog är onödigt komplicerad för att användas för jordlinjediagnostik. Möjligheten att t.ex. upptäcka pågående korrodering är liten då fyllnadsmaterialets egenskaper påverkar resultatet i stor omfattning.

Projektet föreslår att metoden med endera ströminjicering mellan två noder och mätning av magnetfältet ovanför marken eller den transienta elektromagnetiska metoden med en sändarspole och en mottagspole bör studeras närmare då de bör kunna tillämpas med minsta möjliga ingrepp i ett ställverk. Dessa metoder ger dessutom möjligheten till direkt analys av resultaten utan en invers beräkning av t.ex. jordlinjenätets impedanser vilket oftast är ett störningskänsligt problem.

Projektets finansiär, Energiforsk forskningsprogram - Programmet för Underhåll av elnät 2015-2020, anser att de potentiella problem som finns i jordlinjenät behöver utredas vidare, bland annat genom att någon eller några av de berörda metoderna som diskuteras i denna rapport tillämpas i ett reellt jordlinjenät.

## 5 Referenser

- [1] <http://www.hydroquebec.com/learning/transport/parcours.html>
- [2] Svenska Kraftnät, Teknisk riktlinje TR05-13E utg2, "Overhead transmission line earthing".
- [3] Robert G. Olsen and Leonid Grcev, "Analysis of High-Frequency Grounds: Comparison of Theory and Experiment", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 51, No. 6, Nov/Dec 2015, pp. 4889
- [4] H. Griffiths and N. Pilling, "Earthing" in A. Haddad and D. Warne (eds), in *Advances in High Voltage Engineering*, IEE Power & Energy Series, Vol. 40.
- [5] V.R. Lawson, "Problems and Detection of Line Anchor and Substation Ground Grid Corrosion", *IEEE Transaction on Industry Applications*, Vol. 29 No.1, Jan/Feb 1988, pp. 25-32.
- [6] V.I.Kostic, N.B. Raicevic, "A study on high-voltage substation ground grid integrity measurement", *Electric Power Systems Research*, 131 (2016) 31–40.
- [7] F. Dawalibi, "Electromagnetic Fields Generated by Overhead and Buried Short Conductors. Part 2 – Ground Networks, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. PWRD-1, No. 4, October 1986.
- [8] Wikipedia: [https://en.wikipedia.org/wiki/Kelvin\\_bridge](https://en.wikipedia.org/wiki/Kelvin_bridge)
- [9] Liu Jian; Wang Shuqi; Ni Yunfeng; Li Zhizhong; Wang Sen, "Testability of grounding grids corrosion diagnosis," *Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, 2008, pp. 804-808
- [10] J. Liu, W. Lu and J. Wang, "Analysis and application on a family of testability indexes for grounding grids corrosion diagnosis," *High Voltage Engineering*, Issue 3, pp. 493-500, 2009.
- [11] W. Chen, R. Bi, J. Wang, and Hougui Chen, "Review of Grounding Grids Corrosion Diagnosis", *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, Vol. 5, No. 3, June 2013.
- [12] A. F. Otero, J. Cidras, and J. L. del Alamo, "Frequency-dependent grounding system calculation by means of a conventional nodal analysis technique," *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 14, pp. 873–878, July 1999.
- [13] B. Zhang, Z. Zhao, X. Cui and L. Li, "Diagnosis of Breaks in Substation's Grounding Grid by Using the Electromagnetic Method," *IEEE Transactions on Magnetism*, vol. 38, no. 2, March 2002.
- [14] Y. Lu, X. Lin, S. Hao, "Research on Fault Detection Method of Grounding Grids Based on Surface Potential Distribution", *2016 China International Conference on Electricity Distribution (CICED 2016)* Xi'an, 10-13 Aug, 2016

- [15] C. Yu, Z. Fu, Q. Wang, H.-M. Tai and S. Qi, "A Novel Method for Fault Diagnosis of Grounding Grids," *IEEE Transactions of Industry Applications*, Vol. 51, No. 6, November/December 2015, pp. 5182 –5188
- [16] C. Yu, Z. Fu, H.Zhang, H-M Tai and X. Zhu, "Transient process and optimal design of receiver coil for small-loop transient electromagnetics", *Geophysical Prospecting*, 2014, 62, 377–384
- [17] D.K. Cheng, *Field and Wave Electromagnetics*, 2<sup>nd</sup> ed, Addison-Wesley, 1989.
- [18] N.Wagner, K. Emmerich, F. Bonitz, and K. Kupfer, "Experimental Investigations on the Frequency- and Temperature-Dependent Dielectric Material Properties of Soil", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 49, No. 7, July 2011.

# DIAGNOSTIK AV JORDLINENÄT MED NÄTVERKSANALYSATOR

Jordlinjenät i ställverk är av stor betydelse för människors säkerhet. Avbrott eller kraftig korrosion i jordlinjenätet medför en ökad risk för exempelvis högre steg- och beröringsspänningar inom ställverket.

Rapporten diskuterar användandet av nätverksanalysator för att diagnosticera jordlinjenät i ställverk. Resultaten visar att det antagligen skulle vara möjligt på korta avstånd men att fyllnadsmassornas komplicerade dielektriska egenskaper gör det svårt att tydligt upptäcka andra problem än avbrott i ledare. Därför föreslås det att man bör titta närmare på metoder som är baserade på galvanisk eller induktiv ströminjicering och responsanalys av de uppkomna magnetfälten.

## Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. [www.energiforsk.se](http://www.energiforsk.se)



Energiforsk