



# Jordning och jordtag

En metodstudie

# Grounding and earth electrodes

A study in method

av

**Magnus Danielsson**

**Löpnummer: EL1415**

**Magnus Danielsson**

Vt 2014

Examensarbete, 15 hp

Högskoleingenjör i Elkraft, 180 hp

## **Förord**

Detta examensarbete har genomförts vid Elkraftavdelningen hos Tyréns Umeå som en del av programmet "Högskoleingenjör i Elkraft" vid Umeå universitet.

Jag vill här även passa på att tacka min handledare på Tyréns, Nicklas Nilsson samt även tacka Nils Lundgren, min handledare på Umeå Universitet, för god vägledning.

## Sammanfattning

Syftet med detta arbete är att undersöka vilka metoder som används vid bestämning av plats för anläggning av jordtag. Ett jordtag kan anläggas antingen genom ytjordning där ledare läggs längsmed marken, eller via djupjordning där jordelektroder drivs ned i marken.

Den viktigaste egenskapen hos ett jordtag är dess resistivitet. Då markens resistivitet skiljer sig beroende på vilken jordmån som finns blir val av plats viktig.

Jordmånen vid ytan behöver inte heller vara densamma som längre ned i marken vilket ger ett problem vid bedömning av lämplig plats.

Jordtag och jordning är viktigt i elnätet, främst ur en säkerhetssynpunkt, men även ur en ekonomisk synpunkt. Vikten av att ha ett fungerande jordtag med tillräckligt låg resistivitet är väldigt stor. Det kostar pengar att anlägga jordtag, att på ett ekonomiskt och tillförlitligt sätt hitta den bästa platsen kan därmed spara pengar.

Vid utvärdering av jordtag utförs markresistivitetmätningar, den utrustning som används ger dock en begränsad information om markresistiviteten med avseende på mätdjup och täckt yta. Att då på ett tillförlitligt sätt kunna säkerställa att ett jordtag blir så bra som möjligt är en nödvändighet. Är nuvarande metoder tillräckligt bra eller går de att förbättra?

I detta arbete undersöks andra verktyg för att mäta och kvantifiera markresistivitet. En alternativ metod ger möjligheten att få en två-, eller tredimensionell representation av markens resistivitet. Metoden ger även möjligheten att upptäcka annan geologisk beskaffenhet, ihåligheter eller vattendrag under mark.

## Abstract

The purpose of this work is to examine the methods used in determining the place of installation of grounding. An grounding site can be constructed either by *surface grounding* where electrodes are placed parallel to the ground, or through *deep grounding* where an electrode are driven into the ground.

The most important property of a grounding site is its resistivity. Since the soil resistivity differs depending on the soil the choice of location is important.

The soil at the surface need not be the same as deeper underground which gives a problem when considering the appropriate location.

The grounding site and the grounding is important in the electricity grid, mainly from a safety point of view, but also from an economic point of view. Having a functioning grounding with sufficiently low resistivity is of big importance. It costs money to build the grounding site, finding the best location through an economical and reliable method can thus save money.

When evaluating the place for a grounding site a measurement of the ground resistivity must be performed. However, the equipment most commonly used offers limited information on the resistivity with respect to the measurement depth and covered area. To reliably ensure that an grounding site will be as good as possible is a necessity. Are current methods good enough or can they be improved?

This work explores other tools for measuring and quantify the earth resistivity. One of the alternative methods provides a way to get a two or three-dimensional representation of soil resistivity. This method also provides the ability to detect different geological conditions like cavities or watercourses below ground.

# Innehållsförteckning

1 Inledning.....	1
1.1 Mål.....	1
1.2 Syfte.....	1
1.3 Metod.....	2
2 Bakgrund och teori.....	2
2.1 Jordning och jordtag.....	2
2.1.1 Systemjordning.....	3
2.1.2 Jordtag.....	4
2.1.3 Ytjordning.....	4
2.1.4 Jordelektrod/ledare.....	5
2.1.5 Djupjordning.....	5
2.1.6 Strömtäthet.....	6
2.1.7 Potentialhöjning.....	7
2.2 Markresistivitet.....	8
2.2.1 Undersökning av markresistivitet.....	9
2.2.2 Tolkning av mätvärde.....	10
2.2.3 Alternativ mätmetod av markresistivitet.....	11
2.2.4 Förbättring av markegenskaper.....	12
2.2.5 Beräkning av jordtagsresistans.....	13
2.2.6 Resistivitet kontra impedans.....	14
2.2.7 Kontroll av jordtagsvärde.....	16
2.2.8 Designprocess.....	17
3 Jordtag i praktiken.....	17
3.1 Intervju med företag.....	17
3.2 Anläggningskostnad.....	19
4 Resultat.....	19
5 Diskussion.....	19
6 Referenser.....	20

# 1 Inledning

Jordning fyller en viktig funktion inom elkraft. Jordningen kan göras utifrån tre aspekter.

- \* Personskydd
- \* Funktionsjordning
- \* Åskskydd

För att jordningen ska fungera på ett tillfredställande sätt krävs att den punkt som har kontakt med jord har en så låg resistans och impedans som möjligt. Detta krävs för att undvika att höga spänningar uppstår vid jordfel.

För att erhålla jordning görs ett så kallat jordtag. Det är en punkt eller område där man gräver ner elektroder som har kontakt med omgivande mark. Vid dessa elektroder fästs sedan en ledning som dras till den apparat eller struktur som behöver jordas.

Eftersom olika typer av jord har olika resistivitet samt impedans måste en geologisk undersökning utföras för att säkerställa lägets lämplighet för jordtag. Detta följs av en kontrollmätning för att förvissa sig om funktionen. Denna kontroll upprepas sedan med jämna mellanrum för att verifiera att funktionen består.

## 1.1 Mål

Detta examensarbete avser att undersöka arbetsförfarandet som finns vid utvärdering av en lämplig plats för anrättning av jordtag. Hur dessa jordtag utformas och kontrolleras kommer även undersökas. Finns det speciella problem att ta hänsyn till?

Det kommer även undersökas om det finns alternativa metoder, och hur dessa fungerar i relation till vedertagen praxis.

En genomgång av de beräkningsmetoder för jordningsresistans/impedans som finns kommer även utföras.

## 1.2 Syfte

Syftet är att utifrån nuvarande existerande teknik föreslå en alternativ metod för att på ett tillförlitligt och repeterbart sätt skapa underlag för anläggning av jordtag.

## 1.3 Metod

Rapporten utgår i första hand från de standarder som är vägledande när det kommer till jordning. Vidare utfördes intervjuer med anställda på elkraftbolag. Dessa intervjuer utfördes via telefon, mail och personligt möte med ett frågeunderlag. Personerna som intervjuades var Jonny Ohlsson (Umeå Energi), Kaj Eriksson (Vattenfall) samt Fredrik Nykvist (ABEM). Utöver detta användes referensmaterial för ytterligare information.

# 2 Bakgrund och teori

## 2.1 Jordning och jordtag

Anläggningar i elnätet och elektrisk utrustning som används i elnätet måste jordas. Dels jordas anläggningar och apparater med avseende på personskydd, sk skyddsjordning. Det är ett krav att berörings- och stegspänning ej blir för hög och utgör personfara. En andra anledning till jordning är funktionsjordning som ser till att apparaters funktion upprätthålls samt att de inte går sönder om ett fel inträffar. Exempel på utrustning är överspänningsskydd, ventilavledare och annan utrustning som sitter utom räckhåll för personer på mark. En del av detta är åskskydd för att säkerställa att både apparater och elnät ej går sönder samt att överslag i elnätet undviks eller begränsas. [1] Här är viktigt att jordanslutningen är utformad med korta och raka ledningar samt att jordtaget är av lågimpediv karaktär.

Jordtaget utformas i huvudsak på ett av två olika sätt - djupjordning eller ytjordning. Vid djupjordning används metallspett som drivs ned i marken medan det vid ytjordning används en kopparlina som läggs ned i marken. Gemensamt för båda metoderna är att anläggningsdjupet ska vara tillräckligt för att undvika markfrost. Hur effektivt jordtaget är beror på den resistivitet som kan erhållas. Denna bestäms av mängden ledande material nedlagt i marken samt markresistiviteten.

Kraven enligt ELSÄK-FS är att markpotentialen inte får överstiga 150V eller 240V vid bortkopplingstider på 5 respektive 2 sekunder för icke direktjordade system över 25kV. För direktjordade system över 100kV ska fel bortkopplas inom 0,5 sekunder och spänningen får då inte överstiga 600V. Dessa gränser säkerställer att strömmen som flyter genom en kropp begränsas vid ett kroppsmotstånd på 3000 ohm Dessa spänningsnivåer och driftspänningen är det som ställer krav på vilken resistans jordtaget måste uppfylla (enligt  $U=R \cdot I$ ). [5]

Ett begrepp som används för att beskriva jordning i olika anläggningstyper är *jordningsmiljö*. Begreppet beskriver de förhållande som finns och hur jordning utförs i anläggningar som liknar

varandra. Det som beskrivs för varje jordningsmiljö är hur anläggningsdelar jordas, hur jordningar kontrolleras före idriftsättning samt hur tillsyn av jordning utförs. Exempel på olika jordningsmiljöer är distributionsnät (0,4-25kV), icke direktjordat högspänningsnät (25-82kV) eller direktjordat högspänningsnät (>100kV).[13]

### 2.1.1 Systemjordning

Systemjordning är beteckningen på hur ett nät är jordat. De flesta nät är uppbyggda med en Y- eller Z-kopplad transformator där en nollpunkt eller neutralpunkt finns. Systemjordning avser hur denna nollpunkt är kopplad mot jord.[1]

Det finns två huvudprinciper för jordning; direkt jordning eller indirekt jordning. Vid direkt jordning ansluts transformatorns nollpunkt direkt till jord via en ledare. Vid indirekt jordning kopplas en höghomig impedans som ett motstånd, en transformator, eller resistor parallellt med en reaktor mellan jordtaget och det som ska jordas. Se figur 2.1

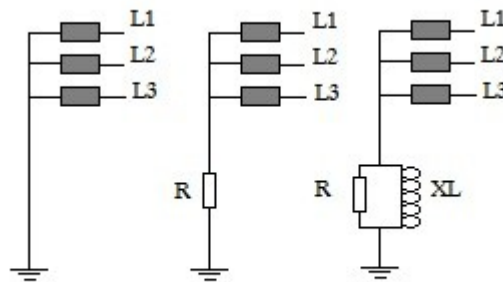


Illustration 2.1: Direkt och indirekt jordning

Systemjordning utförs på olika sätt beroende på var i elnätet jordningen görs. Lågspänningsnät (<1000V) och högspänningsnät (>130kV) har oftast direkt förbindelse med jord, sk direktjordat nät. På mellanspänningsnivå används ofta reaktansjordning.[13]

Direktjordning används för att erhålla en snabb bortkoppling vid enpoligt jordfel. Direktjordningen ska även begränsa spänningsstegringen som sker i marken då ström leds ned i jordtaget. Detta är speciellt viktigt i högspänningsnätet då jordfelsströmmen kan uppgå till ca 30kA. Detta ger förhöjd potential i marken vilket kan ge upphov till farlig steg- och beröringsspänning i närheten av stolpar och ställverk. Potentialökningen kan även störa andra närliggande system om den inte begränsas/hanteras.

Anläggningar dimensioneras för en särskild felström och en viss bortkopplingstid. Traditionellt har bortkopplingstiden varit 1s men med nyare och bättre utrustning har man kunnat korta ned detta till 0,5s. Den kortare bortkopplingstiden bidrar till att högre strömmar kan accepteras.

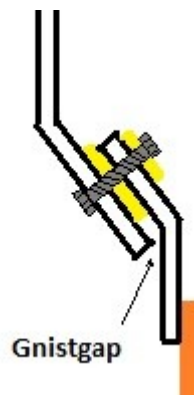
Vanligast är att man dimensionerar för en maximal potentialskillnad på 100V för steg- och beröringsspänning.[13]



## 2.1.2 Jordtag

Jordtag kan utformas som ett ytjordtag eller som djupjordtag. Svensk Energi rekommenderar i deras branschråd (EBR) djupjordning före ytjordning där det är möjligt. Jordtag kan antingen vara ett sk. *primärjordtag* där ett jordtag är gemensamt för ett sammanhängande elnät, eller ett sk. *enskilt jordtag* som är anlagt i närheten av det som ska jordas.

Jordtagen är oftast anslutna via en sk provningsklämma. Det är en punkt där jordtaget kan kopplas ur från nätet så att det enskilda jordtaget kan testas. I de fall då jordledaren är av ett annat material än det som jordas sker denna koppling via ett gnistgap för att undvika korrosion.[13] Gnistgapet isolerar jordledaren och övrig metall från varandra och leder sedan felström via överslag av de två närliggande ledarna. Se figur2.2



*Illustration 2.2: Icke galvanisk kontakt med gnistgap*

Kopplas flera jordtag ihop benämns detta resulterande jordtag och mäts då som en enhet. Speciell hänsyn måste i detta fall tas till varje individuellt jordtag för att erhålla ett korrekt resulterande värde. [13]

## 2.1.3 Ytjordning

Vid ytjordning förläggs en jordledare parallellt med markytan på ett frostfritt djup (typiskt 1m). Ledaren ska vara gjord av koppar, kopparbelagt stål eller varmförzinkat stål.

Används kopparbelagd ställina ska ledarens konduktivitet vara 40% av IACS (“International Annealed Copper Standard”). Kopparskiktet ska vara minst 0,25mm tjockt och ledaren ska klara påfrestningar utan att kopparen släpper från kabeln. [12]

Ledarens area måste vara enligt tabell 1:

Material	Minimal dimension
Kopparlina	35mm <sup>2</sup>
Kopparbelagd ställlina	35mm <sup>2</sup>
Ställlina	50mm <sup>2</sup>
Kopparplåt	1mm x 0,5m <sup>2</sup>

Tabell 1: Dimensionering yttjordning[12]

Vid ledningsdragning kan jordledaren dras parallellt under en luftledning, sk genomgående markledare. Denna jordledare ansluts till varje stolpe och alla stag som den passerar. I största möjliga mån bryts inte denna jordledare annat än vid väldigt stora hinder. Anslutningar till stationer får ej ha brutna jordledare och inga avbrott får finnas inom 1km från stationen. Vid de fall som jordledaren måste brytas avslutas den genom att dra ut ledaren till halva avståndet mellan två stolpar eller avslutas med ett djupjordtag. Även jordad topplina kan användas vid ledningsdragning och erbjuder då åskskydd för ledningen. Topplinan kan kombineras med genomgående markledare. Topplinan kan vara blankledning och kopplas till varje stolpe men kan även vara isolerad från stolparna. Topplinan är kopplad till jordtag i ändarna.

Om jordning ska ske av ett föremål anläggs ett stråljordtag runt detta. Maximalt åtta ledare dras ut från föremålet med tillräcklig långa ledare för att uppnå tillräckligt låg resistans (<100Ω). Stråljordtag kan även kombineras med djupjordtag.[12]

Vid kabelnät förlagt i mark kan en jordledare dras som följeledare parallellt med kabeln. Detta ger förbättrad jordning och kan även användas som arbetsjordning.

## 2.1.4 Jordelektrod/ledare

Jordelektroden eller ledaren som läggs i mark ska uppfylla några grundläggande kriterier. De ska ha tillräcklig ledningsförmåga för att inte påverka slutresultaten. De ska klara den felström som uppstår utan att smälta samt utstå den mekaniska påfrestning som kan ske i och med detta. De ska vara mekaniskt stabila och upprätthålla sin funktion trots mekanisk påfrestning och/eller korrosion.[5]

De material som kan användas är koppar, kopparbelagt stål samt stål. Koppar är naturligt resistent mot korrosion då det i de flesta markmiljöer agerar katod. Kopparbelagt stål har fördelen att det är mindre attraktivt att stjäla. Så länge kopparytan inte skadas klaras markmiljön på ett tillfredsställande sätt. Då stål används måste hänsyn tas till rådande markförhållande och val av stål för att minimera korrosion. Galvaniserat stål ger ett extra skydd liksom behandling av markmiljön. Enligt IEEE rekommenderas rostfritt stål av hög kvalitet. [8]

Aluminium är ett annat material som används i elektriska ledare. Vid förläggning i mark är dock aluminium ofta utsatt för korrosion. Aluminiumoxid är även att betrakta som icke-ledande vilket försämrar dess funktion som jordledare.[8]

## 2.1.5 Djupjordning

Vid djupjordning drivs material ned i marken vertikalt. Det vanligaste är rör, plåt, stång eller vinkelstång gjorda av kopparbelagt stål men kan även bestå av koppar samt varmförzinkat stål och kallas vanligtvis för spett. Det kopparbelagda stålet ska uppfylla kraven nämnda i 2.1.3. Minsta materialdimension är enligt tabell 2:

<b>Material</b>	<b>Minimal dimension</b>
Stålrör	∅49 mm
Stång av kopparbelagt stål	∅16 mm
Vinkelstång av stål	60 x 60 x 6 mm
Kopparplåt	1 mm x 0,5 mm <sup>2</sup>

Tabell 2: Dimensionering av jordelektrod[12]

Spetten drivs ned i marken och ansluts via ledare. Ett spett är vanligtvis 1,5m långt och konstruerat på ett sådant sätt att flera spett kan kopplas ihop och därmed drivas längre ned i marken. Om det behövs kan flera separata spett drivas ned i marken och kopplas ihop för lägre resistans. Avstånden mellan spetten får då inte understiga förläggingsdjupet. Resistansen ska vara max 100Ω och får inte ligga längre än 25m från föremålet som ska jordas.[12]

## 2.1.6 Strömtäthet

Strömtäthet avser hur mycket ström per tvärsnittsarea som går genom en ledare. Är denna för hög kan kabeln bli för varm och skadas eller skada omgivningen.

Den ström som går i ledningen bestämmer vilken maximal jordfelsström som uppstår. Finns det en toppledare kommer strömmen delas upp mellan toppledaren och jordledaren, ca 40% av ledarens ström kommer då vara jordfelsström. [12]

Jordledaren samt nedledaren ska vara av sådan dimension att strömtätheten inte blir för hög. Vid normala fall dimensioneras för en bortkopplingstid på 1s men är kortslutningsströmmarna höga kan systemet dimensioneras för 0,5s efter överenskommelse med Svenska Kraftnät.

Maximal strömtäthet för olika material är enligt tabell 3 :

<b>Material</b>	<b>Max Strömtäthet vid 1s (A/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Max strömtäthet vid 0,5s (A/mm<sup>2</sup>)</b>
Stål	65	90
Koppar	200	275
Kopparbelagt stål (40% IACS)	130	180

Tabell 3: Strömtäthet i material[12]

## 2.1.7 Potentialhöjning

Vid ett fel leds ström ned i marken och kommer med jordtagets resistans ge upphov till en spänning enligt  $U=R \cdot I$ . Denna spänning är som högst närmast jordtagets och sjunker snabbt vid ökat avstånd från jordtagets. Detta brukar visualiseras med en *spänningstratt* [14] enligt figur 2.3. Den potentialskillnad som uppstår mellan olika områden kan vara farlig och måste begränsas.

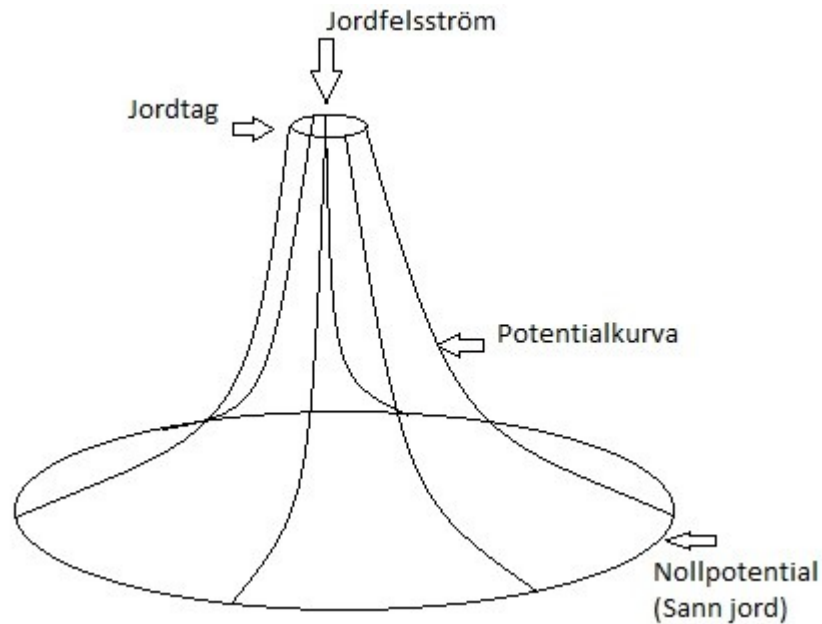


Illustration 2.3: Spänningstratt

Ett annat sätt att visualisera det är enligt figur 2.4

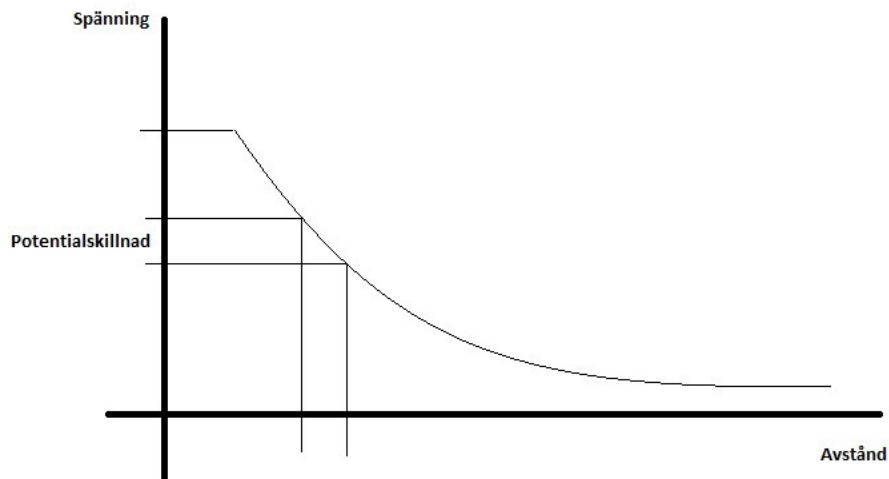
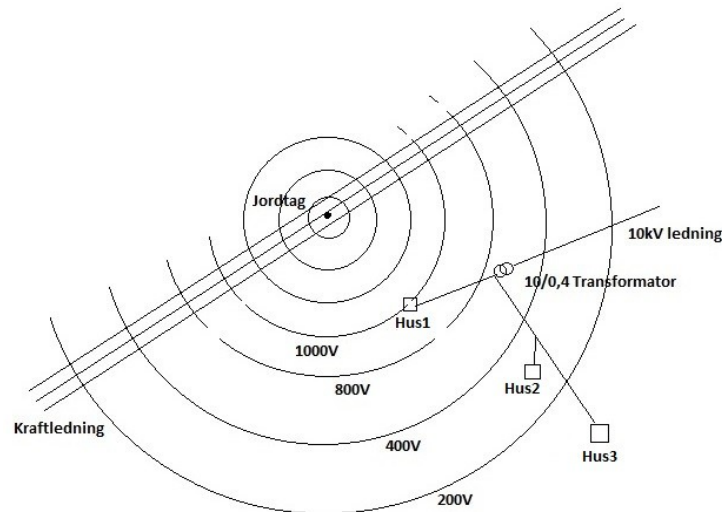


Illustration 2.4: Steg/beröringsspänning

Figuren kan användas både för att förklara begreppet *stegspänning* samt *beröringsspänning* vilket är

den spänning som uppstår mellan en persons två kontaktytor mot marken eller mellan en person och ett föremål. Men på samma vis kan potentialskillnad uppstå mellan två separat jordade föremål. Tex kan en högspänningsledning orsaka en potentialhöjning vid ett fel vilket orsakar potentialskillnad mot ett annat närliggande jordtag enligt figur 2.5



*Illustration 2.5: Potentialhöjning från jordfel i kraftledning[13]*

## 2.2 Markresistivitet

Markens förmåga att leda ström beror på de egenskaper som jordmånerna har. Lerig mark med mycket vatten leder ström bättre medan stenig mark eller berg har väldigt dålig ledningsförmåga. Det betyder även att en och samma jordmån har olika resistivitet beroende på årstid och från år till år. Ett år med mycket nederbörd ger fuktigare mark och lägre resistivitet medan torrare år ger motsatsen. Exempel på typisk markresistivitet ses i tabell 4

Typ av jord	Resistivitet ( $\Omega\text{m}$ )
Kärr	<30
Lerjord	20-100
Matjord	10-150
Sandlera	50-500
Kal, stenig mark	1500-3000
Gräsbevuxen, stenig mark	300-500
Mjuk kalksten	100-300
Skiffer	800
Nedbruten granit och sandsten	1500-10000
Sten av granit och sandsten	100-600

Tabell 4: Typisk markresistivitet[4]

## 2.2.1 Undersökning av markresistivitet

Den metod som är standard i branschen är *vertikal elektrisk sondering* (VES) enligt Wenner-metoden. Mätverktyget som kan beskrivas som en förvuxen multimeter har ofta flera olika mätfunktioner inbyggt och utför beräkningar automatiskt. Begränsningarna med mätning enligt Wenner-metoden är att man endast får ett enskilt mätvärde för en enda plats. Mätningar bör göras i flera olika riktningar och med ett varierande avstånd mellan de yttersta mätsonderna. [8] Mät djupet är ca 1/5 av avståndet mellan de yttersta mätsonderna. Hur markresistiviteten ser ut utanför den aktuella linje som mäts och under det aktuella mätdjupet vet man inget om. Vill man ha kunskap om en större yta måste förfarandet upprepas på denna nya yta. På samma sätt måste elektrodavståndet varieras för mätning på flera olika djup. Till följd av detta blir det väldigt många neddrivningar av elektroder i marken och både tidsödande och arbetsamt. Mätmetoden tar även en del antagande i beaktning vid tolkning av resultatet som därmed inte blir helt exakt. Tex antas att marken är parallell med horisonten och oändligt lång. Detta är som bekant sällan fallet utan marken är ofta kuperad och ändrar egenskaper från plats till plats. Metoden ger med andra ord begränsad information och beslut måste tas utifrån en tolkning av denna. Fördelen är att utrustningen är relativt billig och kostar ca 85 tusen kronor. Principskiss för mätning enligt Wenner-metoden ses i figur 2.6

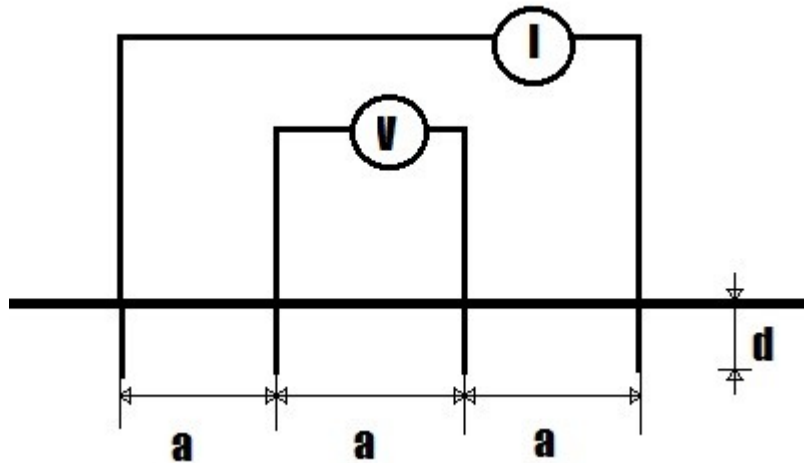


Illustration 2.6: Principskiss Wenner-metoden[8]

Mätmetoden går ut på att ström i de yttersta elektroderna skapar en spänning mellan de två inre elektroderna. Genom att dela spänningen mellan de två inre med strömmen från de två yttre elektroderna kan en resistans beräknas. Markresistiviteten fås sedan enligt formel (1)[8]

$$\rho_a = \frac{4 \pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{(a^2 + 4d^2)} - \frac{a}{\sqrt{(a^2 + d^2)}}}} \quad (1)$$

$\rho_a$ = skenbar markresistivitet  $\Omega\text{m}$

R= resistans i  $\Omega$

a= avstånd mellan elektroder i meter

d= djupet på elektroder i meter

## 2.2.2 Tolkning av mätvärde

Tolkning av det uträknade värdet är komplicerat. Syftet är att utifrån det mätvärde som erhålls kunna sluta sig till vilken resistivitet marken faktiskt har. Beroende på vilken jordmån det finns kommer värdet dessutom ändras både horisontellt och vertikalt. De två vanligaste modellerna som används är uniform jordmodell och två-lagers jordmodell. I den uniforma modellen antas att resistiviteten inte ändras utan att marken är homogent uppbyggd av ett lager. I två-lagersmodellen antas två lager med olika resistivitet finnas, ett övre lager med ett begränsat djup och ett undre lager med ett obegränsat djup.[8]

Med den uniforma jordmodellen beräknas den resulterande markresistiviteten genom att medelvärdesbilda alla mätvärden för en yta enligt formel (2)

$$\rho_r = \frac{\rho_{a1} + \rho_{a2} + \rho_{a3} + \dots + \rho_{an}}{n} \quad (2)$$

En nackdel med denna beräkning är att om markförhållandena varierar mycket över mätytan kommer många mätvärden att skilja sig markant mot de andra. Modellen måste alltså användas med försiktighet. Två-lagersmodellen antar istället två skilda lager med distinkt skillnad i resistivitet. Denna abrupta skillnad mellan de två lagren beskrivs med en reflexionsfaktor (K) enligt formel (3)

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2} \quad (3)$$

där

$\rho_1$  = övre jordlagers resistivitet  $\Omega\text{m}$

$\rho_2$  = undre jordlagers resistivitet  $\Omega\text{m}$

Två-lagersmodellen kan lösas grafiskt där alla mätvärden ( $\rho_a$ ) plottas och  $\rho_1$  och  $\rho_2$  uppskattas utifrån hur mätvärden är grupperade. Mätvärden som är närmare varandra är  $\rho_1$  och mätvärden som är längre från varandra är  $\rho_2$ . Förhållandet  $\rho_2/\rho_1$  jämförs sedan med förhållandet  $\rho_a/\rho_1$  och ett värde på  $\rho_a$  kan sedan beräknas. [8]

### 2.2.3 Alternativ mätmetod av markresistivitet

Inom geologin har det länge funnits ett annat verktyg att använda. Detta kallas för *Resistivitetstomografi-mätning* (RTM). Metoden liknar VES-metoden som redan används inom elkraftbranschen, dvs mätsonder förs ned i marken i ett särskilt mönster. Skillnaden ligger i hur mätsignalerna ser ut och hur man bearbetar informationen. Förenklat kan man se det som att Wenner-metoden är analog medan RTM är digital och beroende av datorkraft för tolkning och bearbetning av insamlad data. Datat sammanställs i ett program till en 2-dimensionell representation med hög exakthet.

En tillverkare av denna typ av utrustning är ABEM som har ett verktyg kallat Terrameter. Till utseendet liknar den VES-utrustning skillnaden ligger i hur elektroderna placeras.

Till Terrameter kan man koppla valfri längd mätkabel. Denna har kopplingspunkter längsmed kabeln där neddrivna sonder kan kopplas in. Skillnaden mot VES-metoder med fyra elektroder är att man istället för att mäta från fyra punkter som sedan flyttas för en ny mätning kan mäta en större yta via flertalet sonder. Arbetsåtgången är jämförbar med VES-mätning men skillnaden är att den resulterande resistivitetsmätningen täcker en större yta, djup och ger bättre precision. Den vanligaste konfigurationen som kunder köper är 4 kablar på 100m längd där 81 elektroder förs ned i marken. Då kan man mäta ned till ca 70m djup i en konform. Maxlängden för utrustningen är 1,6km med ett mätdjup på 250-300m.

Priset för standardkonfigurationen med 4x100m kabel är ca 320 tusen kronor. Men då utrustningen förmodligen inte behövs så ofta kan det vara ett kostnadseffektivt alternativ att hyra utrustning när så behövs. En låg kostnad i förhållande till borrhning för verifiering av markförhållanden kan därmed uppnås. Metoden kan dessutom visa objekt som sten, hålrum och vattendrag under markytan vilket i vissa fall kan vara fördelaktigt. Ett exempel på hur en 2-D representation kan se ut syns i figur 2.7



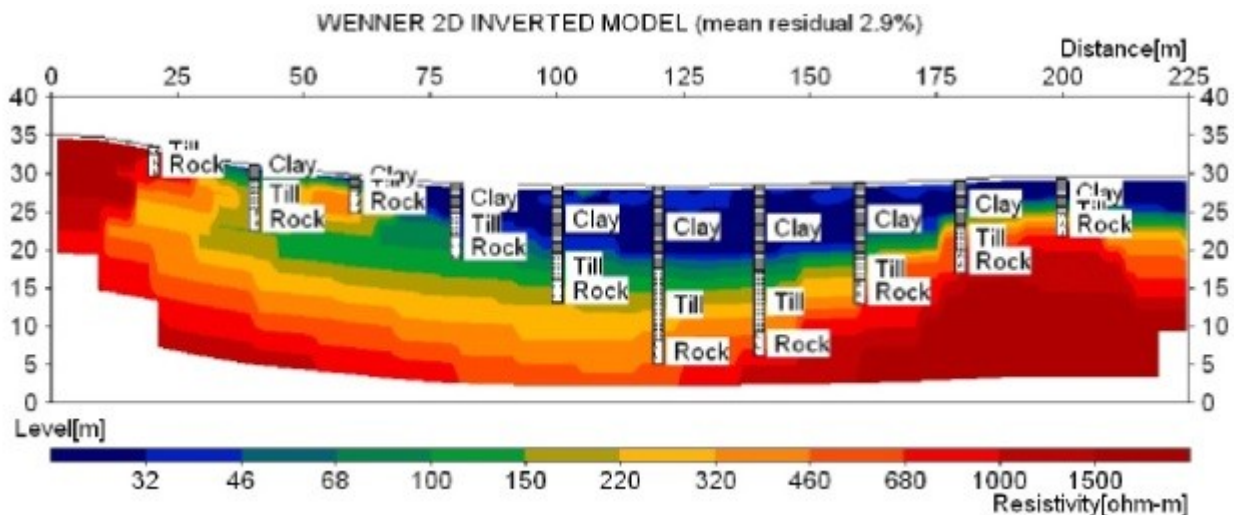


Illustration 2.7: Representation av markresistivitet Terrameter

En 3d representation kan även göras om flera mätningar görs parallellt. Programvaran tolkar då den mätdata som insamlats samt extrapolerar informationen mellan mätlinjerna så en (pseudo) 3-dimensionell bild erhålls. En väldigt arbetsintensiv process men som ger en bild av en stor yta med hög precision även vid kraftigt varierande terräng och markförhållanden.[9]

En annan metod som utnyttjar elektriska egenskaper i marken är *Transient Electromagnetic Method* (TEM). Här utgår man från Faradays lag om induktion och Lenz lag. En ring strömsätts med likström vilket skapar ett magnetfält. Magnetfältet inducerar en ström av varierande storlek i jordlager och föremål. Denna ström ger i sin tur upphov till magnetfält vilka kan mätas och styrkan på dessa olika magnetfält kommer bero på den resistivitet som finns i marken.[10]

Fördelen med metoden är att ingen galvanisk kontakt behövs med marken. Mätningen går fort att göra och eftersom man inte behöver flytta jordelektroder kan stora ytor mätas på relativt kort tid. Metoden är dock känslig för omkringliggande magnetfält och fungerar inte i närhet av annan strömförande utrustning. Utrustningen är dessutom dyr (ca 600 tusen).

## 2.2.4 Förbättring av markegenskaper

I de fall då markegenskaperna är för dåliga, tex i bergstrakter eller stenig mark, för att erhålla en bra kontakt mot jord kan marken behandlas kemiskt på olika sätt. Det kan tex vara olika salter som blandas i marken för att förbättra de ledande egenskaperna eller fyllnadsmaterial som har bättre fuktegenskaper. Gemensamt för dessa olika behandlingar av markegenskaper är att de inte är beständiga utan kräver underhåll om funktionen skall behållas. I vissa fall kan de dock vara nödvändiga för att tillräckligt bra jordtagsvärde ska kunna uppnås. Företaget Erico har en kolbaserad cementprodukt som kan användas i borrhål för jordelektroder. Materialet som kallas *Ground Enhancement Material* (GEM) ger en bra koppling mellan jordelektrod och omkringliggande material och sänker resistivitetsvärdet markant. Då det är en cementprodukt så härdar materialet och funktionen kan erhållas under lång tid.

## 2.2.5 Beräkning av jordtagsresistans

Jordtagets resistans bestäms av jordledarens resistivitet samt markens resistivitet. Resistansen för en jordelektrod kan beräknas enligt formel (4) [3]

$$R_j = \rho * 6,283 * L * \left( \ln \frac{8 * L}{d} - 1 \right) \quad (4)$$

$\rho$  = markresistivitet

$L$  = elektrodlängd i meter

$d$  = elektroddiameter i meter

Enligt detta så får en 1,5m lång jordelektrod med diametern 16mm en resistans på  $0,189 * \rho$ . För att förbättra detta värde kan sedan längden elektrod som drivs ned i marken ökas eller så kan antalet separata elektroder ökas. Om dessa placeras på tillräckligt avstånd ifrån varandra kan de anses vara parallellkopplade. Resistansen kan då approximeras enligt formel (5)

$$\frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (5)$$

En mer exakt beräkning är formel (6)[3]

$$R = R_j * KN \quad (6)$$

$R_j$  = resistansen från en jordelektrod

$K$  = kombinationsfaktor  $0,377527 * \ln(N) + 0,89057$

$N$  = antalet separata jordelektroder (placerade på rätt avstånd från varandra)

En elektrod har en inverkan på omkringliggande jord där den kan anses ha en elektrisk koppling. Det illustreras som en sfärisk utbredning ifrån elektroden och har en radie på 1,1 gånger anläggningsdjupet. För att två elektroder ska fungera optimalt bör dessa därför inte placeras närmare än sina respektive sfärer. Därför rekommenderas att de placeras minst 2,2 gånger anläggningsdjupet ifrån varandra för bästa effekt [3], se figur 2.8

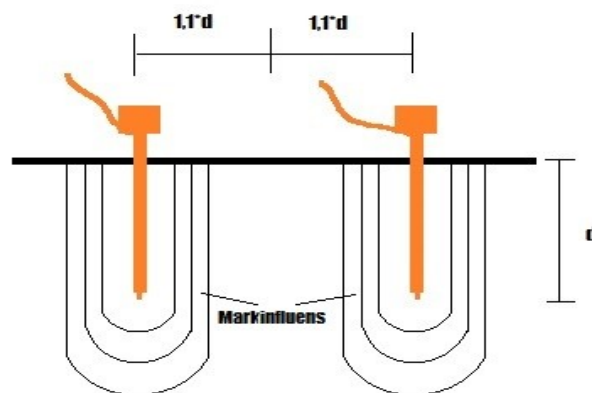
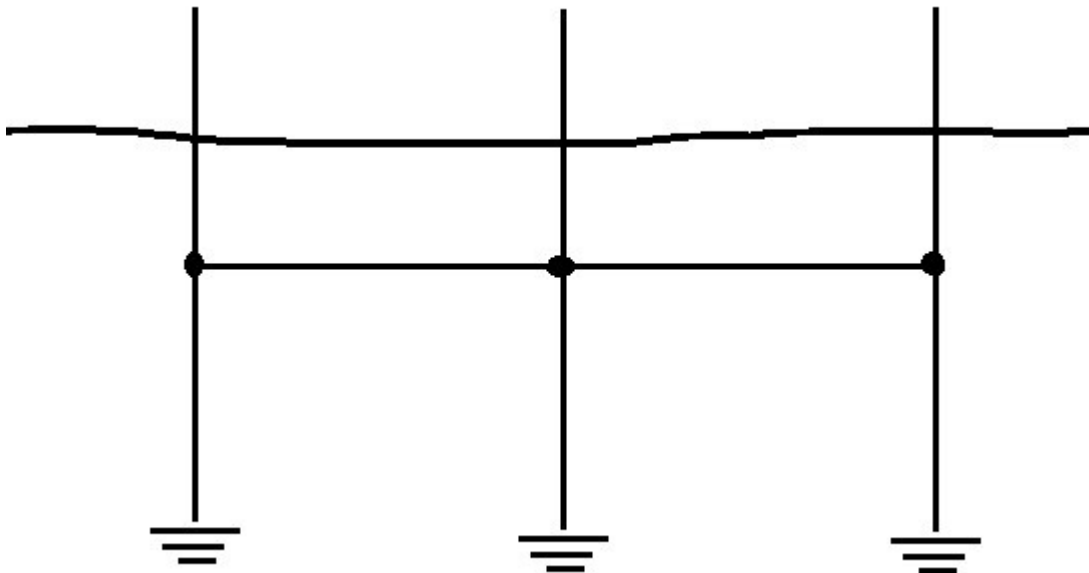


Illustration 2.8: Jordelektrod och dess markinfluens

## 2.2.6 Resistivitet kontra impedans

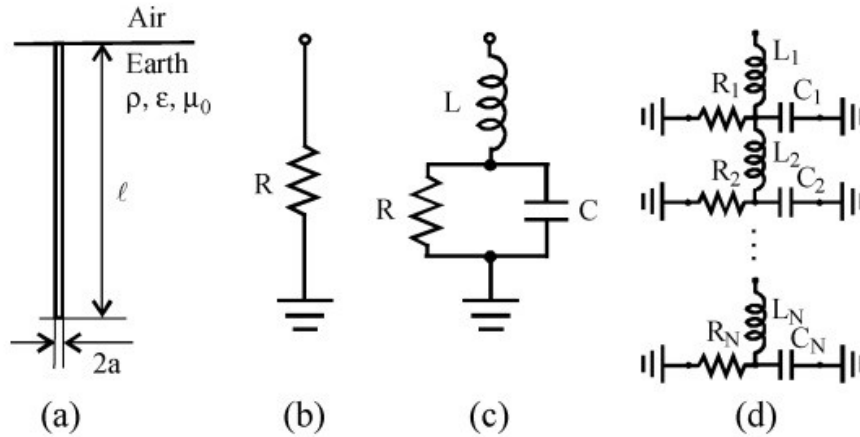
Oftast då man talar om jordtagsvärde är det dess resistans som avses. Det finns dock situationer då jordslutningens impedans bättre beskriver jordtagets funktion. I de flesta fall är det funktionsjord som avses för vilket resistansvärdet är tillräckligt pga den låga frekvensen i växelströmsnätet. Men när det kommer till EMC (Electromagnetic Compatability) och åsknedslag blir jordtagets induktans en viktig parameter att ta i beaktning. För att detta andra kriterium ska vara uppfyllt behöver jordtagets utformning konstrueras på ett lämpligt sätt. En av de sämsta konstruktionerna med avseende på detta är ett gemensamt djupjordtag. Istället bör jordtaget utformas med flera parallella jordelektroder som är sammankopplade enligt figur 2.9



*Illustration 2.9: Jordningsprincip för lägre induktans*

Jordtaget kan anläggas i linje eller som en ringledare huvudsaken de utformas enligt principen med flera jordningspunkter.[2]

Beräkning av jordtagets impedans är mer komplicerat än den förenklade resistivitetsberäkningen. För en så exakt beräkning som möjligt kan Electromagnetisk (EM) fältteori användas. Denna är dock väldigt komplicerad och en något förenklad modell är befogad. Två modeller för beräkning av impedans finns: R-L-C-modell och distribuerad parametermodell.[7] Se figur 2.10



(a) fysik representation av jordelektrod  
 (b) resistivitetsmodell av jordelektrod  
 (c) R-L-C-modell av jordelektrod  
 (d) distribuerad parametermodell av jordelektrod

Illustration 2.10: Olika modeller för jordelektrod

R-L-C-modellen kan beräknas på två olika sätt som dock ger ungefär samma resulterande impedans mot jord. Se formel (7) och (8)

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \log \frac{2l}{a} (\Omega)$$

$$C = 2\pi \epsilon l \left( \log \frac{2l}{a} \right)^{-1} (F) \quad (7)$$

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \log \frac{2l}{a} (H)$$

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left( \log \frac{4l}{a} - 1 \right) (\Omega)$$

$$C = 2\pi \epsilon l \left( \log \frac{4l}{a} - 1 \right) (F) \quad (8)$$

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left( \log \frac{2l}{a} - 1 \right) (H)$$

där

$\rho$  = markresistivitet

$\epsilon$  = markens permittivitet

$\mu_0$  = markens permeabilitet

$l$  = jordelektrodens längd

$a$  = jordelektrodens diameter

För beräkning enligt distribuerad parametermodell se formel (9)

$$R' = \frac{1}{G'} = R * l (\Omega m)$$

$$C' = \frac{C}{l} (F/m)$$

$$L' = \frac{L}{l} (H/m) \quad (9)$$

$$Z = Z_0 * \coth \gamma l$$

$$Z_0 = \sqrt{\left(\frac{j \omega L'}{G' + j \omega C'}\right)}$$

$$\gamma = \sqrt{(j \omega L' (G' + j \omega C'))}$$

där

$Z_0$  = jordtagets karakteristiska impedans

$\gamma$  = ledarens propageringskoefficient

En approximation av (9) kan göras om elektroden delas upp i ett antal fiktiva R-L-C sektioner. Dessa kan sedan beräknas enligt formel (10)

$$R_n = \frac{R' * N}{l}, \quad C_n = \frac{C' * l}{N}, \quad L_n = \frac{L' * l}{N}, \quad n = 1, 2, 3, \dots, N \quad (10)$$

Formel (7) och (8) utgår ifrån en lågströmsmodell men kan även användas för höga, icke linjära strömmar som blixtnedslag. Då en blixurladdning leds ned i marken bryts markens elektriska egenskaper ned och gnistbildning sker. Detta ger en bättre elektrisk koppling mellan elektrod och jord. [7] Så istället för att räkna med en statisk resistivitet kan denna ersättas med en icke linjär resistans som ändras över tid enligt formel (11)

$$R(t) = \frac{R}{\sqrt{\left(\frac{1+i(t)}{I_g}\right)}}; \quad I_g = \frac{E_0 \rho}{2 \pi R^2} \quad (11)$$

där

$i(t)$  = strömmen genom elektroden

$E_0$  = markens kritiska elektriska fältintensitet (ca 300kV/m)

$R$  = given i formeln (7) eller (8)

Formel (7) och (8) stämmer bara upp till några hundra hertz men kan användas för att få en preliminär uppskattning om impedansen. Formel (9)/(10) har visat sig stämma bättre överens med EM-modellen men är inte helt korrekt för de allra högsta frekvenserna. Båda modeller är beroende av den markresistivitetsmodell som används. [7]

## 2.2.7 Kontroll av jordtagsvärde

Kontrollmätning av jordtagets resulterande resistivitet är ett krav. Utöver jordtagsvärde kan även berörings- och stegspänning mätas. [11] Ett nyanlagt enskilt jordtag kontrollmätas med bryggmätning

med svagström. Om större nät ska testas används starkströmsmetoden, denna används även då kontroll av stegspänning görs. Om delar av ett nät behöver mätas utan att kopplas ifrån kan högfrekvensmetoden användas. [13]

## 2.2.8 Designprocess

Hur jordningssystemet ska se ut beror först och främst på de behov som finns i en station eller föremål som ska jordas. De felströmmar, utlösningstider och layout på stationen som finns kommer ställa krav på vad jordtaget ska klara av. När sedan jordtaget anläggs kan det göras i följande ordning [11]:

- (a) kartläggning av markförhållanden som markresistivitet, topografi etc
- (b) avgör hur mycket av felströmmen som avges i marken från jordsystemet
- (c) avgör vilken resulterande impedans jordningssystemet får baserat på markresistivitet, layout och parallella jordelektroder
- (d) avgör vilken potentialhöjning det blir runt jordtaget
- (e) avgör beröringsspänning runt jordtaget
- (f) om potentialhöjningen och beröringsspänningar är acceptabla är designen klar
- (g) om inte kontrollera att beröringsspänningar är acceptabla inom och i närheten av jordningssystemet
- (h) om höjningen av markpotentialen utgör ett problem för närliggande områden åtgärdas de delar av jordningssystemet som är undermåligt.

# 3 Jordtag i praktiken

För att undersöka hur jordtag hanteras rent praktiskt har personer som jobbar med jordning på Umeå Energi och Vattenfall intervjuats. Dessa två företag skiljer sig åt på så vis att Umeå energi är ett distributionsföretag som i huvudsak driver och underhåller stadsnät. Vattenfall är ett större företag som i huvudsak har produktion och högspänd distribution. Detta gör att deras ingång till jordningsproblematiken ser olika ut.

## 3.1 Intervju med företag

Umeå Energi (UE) har till största del ett stadsnät där stora delar är nedgrävd kabel. Eftersom det med denna kabel dras en följeledare så blir hela kabelnätet i princip ett enda sammanbundet jordtag. Låga resistivitetsvärden är därför inget problem samtidigt som ett maskat markbundet nät ger god

potentialutjämnning. Jordningen utgörs av ett gemensamt huvudjordtag samt flertalet separata jordtag, sk samjordning. För stadsnät kallas detta för *utbrett jordningssystem enligt figur 3.1* och är i princip ett *sammanhängande kabelnät* (se figur 3.2) dockt föreligger ytterligare särskilda krav som ska vara uppfyllda innan det kan kallas för detta.

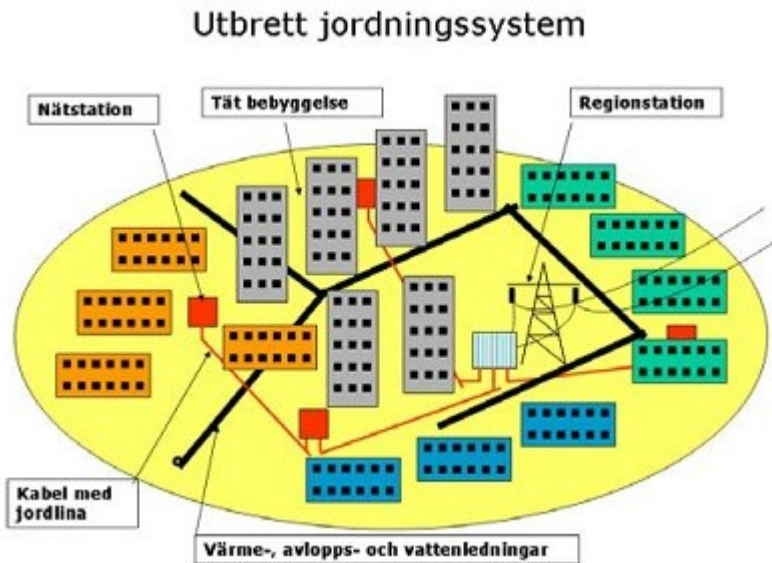


Illustration 3.1: Utbrett stadsnät enligt EBR[9]

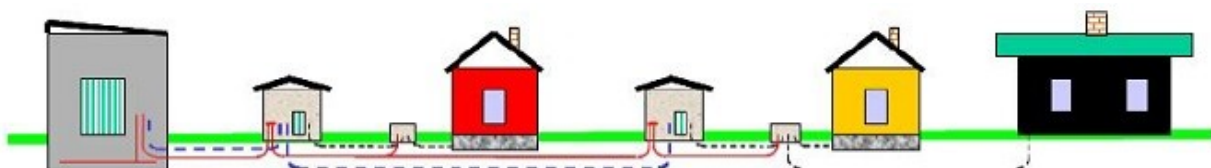


Illustration 3.2: Utbrett kabelnät enligt EBR [9]

Inom stadsnätet är valfriheter vad gäller plats väldigt begränsat och placering av anläggningar och eventuella jordtag är underordnat de faktiska förhållanden och de elkraftbehov som finns. Då kabelstölder blivit ett mer uppmärksammat problem har UE börjat överväga material i ledaren. Men koppar är det som i huvudsak används. Djupjordning föredras framför ytjordning då jordtag anläggs och något som är tydligt är att det är funktionen som är viktig, kostnaden för jordtaget är underordnat detta.

Vattenfall bygger mycket av sina ledningar och anläggningar ute i landet och är därmed friare i sitt val av placering. Om möjligt utgår Vattenfall från geologisk data och översiktskartor för transmissionsnät (30-150kV). Jordtagen kan därmed placeras på mer optimal plats i dessa fall. Ofta är det dock behovet som styr även här.

Vid lokalnät (0,4-24kV) är det precis som för Umeå energi oftast elkraftbehovet som styr placering av anläggningar. Eftersom jordtaget måste ligga i närheten av anläggningen blir valet av plats trots allt begränsat.

Jordtag läggs i änden av lågspänningsgrupper och vid nätstationer. Mellan nätstationer används

följeledare så jordtagen kopplas ihop. Mark med hög vattenhalt som ler- eller myrmark föredras då dessa ger låga resistivitetsvärden.

Djupjordning är den föredragna metoden vid anläggning av jordtag men i praktiken blir det ofta i kombination med ytjordning. Jordtaget utformas oftast för att klara alla jordningsfunktioner, dock kan det i vissa fall endast handla om funktionsjordning varvid kraven blir lägre.

Kontroll av jordtagets resistivitet görs med bryggmätning var 8:e år. Resulterande jordtagsvärde mäts vid nätstationen. Är värdet för högt så kontrolleras varje enskilt jordtag i kretsen för att komma fram till vilket/vilka jordtag som måste förstärkas.

## 3.2 Anläggningskostnad

Kostnaden vid anläggning av jordtag är uppdelad i ett par områden. Först kommer planering och etablering. Krav upprättas och information om aktuella förhållanden inhämtas och analyseras. Mätning av markresistivitet och beräkning av jordtagsvärde kan utföras. Maskinist för bearbetning av marken samt montör av ingående delar anlägger sedan jordtaget och dess förbindelse.

Mätningar och beräkningar kan utföras men utgör en extra kostnad som inte alltid är befogad. En enklare översikt av området och val plats samt metod utifrån detta kan ha sina fördelar om man betänker prisskillnaden mellan en entreprenör (tex grävmaskinist) kontra en ingenjör. Då mätvärden på markresistivitet är beroende på aktuella förhållanden och ändras över året kan de anses relativt osäkra.

## 4 Resultat

Baserat på denna studie rekommenderas att använda *resistivitetstomografimätning* för undersökning av markförhållanden. Fördelarna med denna metod jämfört med *vertikal elektrisk sondering* är att för en relativt modest investeringskostnad kan tydligare svar på vilken markresistivitet marken har erhållas.

Dessutom fås mätvärden för en större yta och till ett större djup än den utrustning som används konventionellt trots jämförbar arbetsinsats. Denna utrustning kräver relativt låg expertkunskap vad gäller tolkning av markresistivitetsvärden och därmed större trovärdighet vid uppskattning av resulterande jordtagsvärde.

Detta bör dock utvärderas mer och resultatet upprättas i en standard för att branschen ska få full behållning av dess värde.

## 5 Diskussion

Att närma sig ämnet jordning och anläggning av jordtag är inte helt enkelt. Dels är det svårt eftersom teori och praktik inte alltid går ihop så bra. Att på teoretisk grund med säkerhet avgöra om ett jordtag får tillräckligt lågt jordtagsvärde är väldigt svårt. Mycket beror det på att markresistivitet ändras beroende på väder, årstid och olika år (mycket eller lite årsnederbörd). Det är närmast som att arbetet närmas med en viss ”magi” där vissa erfarna personer gör antaganden om markförhållanden och var lämpliga platser för jordtag finns. I realiteten verkar det dock finnas en del pragmatism inblandad och



man försöker tills det blir rätt. Jordelektroder/linor förs ned i marken och uppnås inte tillräckligt värde så läggs mer material i marken. I vissa fall kan man med stor säkerhet avgöra om jordtaget blir bra, tex vid anläggning i myrmark, men i många fall verkar värdet vara förknippat med en viss osäkerhet. ”Tillräckligt” bra är en devis som lätt kan anammas. Då flera jordtag dessutom kopplas ihop kan låga resistivitetsvärden erhållas. Men är det tillräckligt för att all funktion ska uppnås på ett tillförlitligt sätt? Inom eldriftsvidan jobbar man enligt ”n+1” och ser alltid till att det finns marginaler för tänkbara fel. Eftersom anläggningen i sig är det som avgör placering av jordtaget i många fall blir man något låst vad gäller tillgängliga platser för jordtag. I vilken utsträckning som den tillgängliga ytan undersöks är oklart men med nuvarande verktyg där fyra elektroder måste flyttas väldigt många gånger för att täcka en liten yta verkar det osannolikt att områdets markresistivitet undersöks speciellt noggrant. Här tycker jag resistivitetstomografi-mätningar verkar erbjuda en enklare metod för att täcka större områden och dessutom få högre precision på mätningen. Både större yta och djup kan täckas i en mätning samtidigt som resultatet presenteras grafiskt. Att andra markegenskaper dessutom erhålls kan vara till stort värde. Tar man med i beräkningen att bygga jordtag för bättre impediva egenskaper så kommer jordtaget att bli mer utbrett. En större yta kan därför behöva undersökas så bästa placering av de enskilda jordpunkterna kan hittas. Vid planering och ritning av en anläggning kan det dessutom finnas vits med att i förväg veta vilka markförhållanden som existerar. Inte bara med avseende på markresistivitet men även övriga markförhållanden som kan vara av intresse. Med bättre verktyg ges större möjlighet till ett mer tillfredsställande jordtagsvärde. Då det dessutom är en kostnad involverad i att frakta maskiner och materiel ut i skogen ger en bättre förundersökning av markförhållanden en möjlighet att spara pengar både i form av maskintimmar, men även i form av material som grävs ned i marken. Det finns förstås även en miljömässig poäng med detta då mindre mindre mark behöver röras samt färre maskintimmar betyder mindre utsläpp.

En sak som framkom under min fördjupning i ämnet är att jordningssystemet så som det är byggt och byggs idag följer en något gammal mall. Även om erfarenhet är ytterst värdefullt är det tydligt att de framsteg som gjorts i mätinstrument och kraften i datorberäkning inte utnyttjas till den grad som det skulle kunna göras. Dessutom värderas nätets traditionellt sett grundläggande funktion väldigt högt i förhållande till de förändringar som nu sker i elnätet. Det finns flera exempel på detta. Ett exempel är EMC som potentiellt kan bli ett problem. Ett annat exempel är nedgrävningen av elnätet där luftledningars ersätts med kabel i mark. Båda dessa fenomen påverkar balansen mellan kapacitiva och induktiva strömmar i elnätet vilket i sin tur betyder att balansen mellan plus- minus och nollföljdströmmar påverkas. Dessa ändringar i nätet kan, om inte jordningen hanteras korrekt, göra att konventionellt jordad utrustning inte fungerar som den ska. Har jordtaget ett olyckligt impedansförhållande kan strömmar krypa åt fel håll och störa eller helt förstöra funktionen hos utrustning som nollpunktsreaktorer. Fenomenet är förstås känt och hanteras genom att använda hjälptransformatorer som balanserar upp den ökade kapacitansen i nätet. Ett problem är dock att nättinnehavaren inte alltid är den som sköter installation och drift. Ändringar i elnätet förmedlas inte alltid till berörda parter så att kompensationsutrustning kan ändras efter nya förhållanden. Vad gäller EMC så sker det en ombyggnad av nätet där allt mer av kontrollutrustningen är elektronisk/digital och därför mer känslig för störningar. Det pratas även en hel del om framtidens nät, SmartGrid, där mer elektroniska funktioner ska integreras i elnätet. Det kan därför vara klokt att tänka över konstruktionen av jordtag i vissa fall.

## 6 Referenser

- [1] Almgren, Åke & Blomqvist, Hans (2003). *Elkraftshandboken. Elkraftsystem*, 2. 2 uppl. Stockholm: Liber
- [2] Benda, Dr Sten, *Jordningssystem och potentialutjämning i stora installationer*, ABB Tidning nr 5 1999
- [3] Carpenter Jr., Roy B & A. Lanzoni, Joseph, *Designing for a low resistance earth interface (Grounding)*, Lightning eliminators & consultants
- [4] Chauvin-Arnoux, *Jordtag- och jordresistivitetmätning*, 2011, CA Scandinavia, Täby, [http://www.camatsystem.com/datablad/SE\\_%20Jordtagsm%C3%A4tningsguide.pdf](http://www.camatsystem.com/datablad/SE_%20Jordtagsm%C3%A4tningsguide.pdf) (hämtad 2014-03-15)
- [5] ELSÄK-FS 1999:5, *Starkströmsföreskrifterna*, Elsäkerhetsverket, Stockholm: Eladers Gotab
- [6] Fluke, *Earth ground resistance*, Fluke Corporation, [https://support.fluke.com/find-sales/Download/Asset/2633834\\_6115\\_ENG\\_A\\_W.PDF](https://support.fluke.com/find-sales/Download/Asset/2633834_6115_ENG_A_W.PDF) (hämtad 2014-01-17)
- [7] Grcev, L., Popov, M., R. On High-Frequency Circuit Equivalents of a Vertical Ground Rod, IEEE transactions on power delivery, vol 20, nr 2, s. 1598 - 1603, apr. 2005.
- [8] IEEE std 80-2000, *Guide for safety in AC substation grounding*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Institute of Electrical and Electronics Engineering, New York: IEEE
- [9] Loke, Dr M.H., *A practical guide to 2-D and 3-D surveys*, Penang Malaysia: ABEM, <http://www.abem.se/support/downloads/case-studies/practical-guide-to-2d-3d-surveys> (hämtad 2014-04-28)
- [10] Nabighian, M.N. & Macnae, J.C., 1991: *Time Domain Electromagnetic Prospecting Methods*, Vol. 2, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma
- [11] SS-EN 50522, 2011, Svensk Elstandard SEK, Kista
- [12] TR 05-13, *Luftledningar Jordning*, utgåva 2, 2012, Svenska Kraftnät, Sundbyberg: SVK
- [13] U301E:10, *Allmänt jordning*, Svensk Energi, Stockholm: EBR
- [14] VAST, *Jordning av stationer och ställverk*, 1987, Vattenfalls jordningskommite