

Redovisning 05-01-28,

EXAMENSARBETE FÖR CIVILINGENJÖR 180 P,  
ELEKTROTEKNIK

## REDUCERING AV ELEKTRISKA FÄLT I STÄLLVERKSMILJÖ

Anneli Pettersson  
Charlotte Österlund



**CHALMERS**

Institutionen för Signaler och System  
Chalmers Tekniska Högskola  
Göteborg, Sverige 2005

Handledare: Kjell-Åke Persson, Svenska Kraftnät,  
Yngve Hamnerius, Chalmers  
Examinator: Yngve Hamnerius, Chalmers



## Sammanfattning

Europaparlamentet och Europeiska rådet antog ett direktiv 2004/40/EG av den 29 april 2004 gällande maximala nivåer på elektromagnetiska fält i arbetsplatser. Jenny Åke och Johanna Fracke har i sitt arbete (2004, s. 34), konstaterat att de elektriska fälten på flera platser i 400 kV-ställverket beläget i Stenkullen överstiger det av direktivet fastställda insatsnivån på 10 kV/m. Denna rapport innefattar metod för skärmning av elektriska fält i 400 kV-ställverk genom passiva skärningsvagnar hängande på tre meters höjd. Denna skärmning ska kunna användas för att reducera de elektriska fälten till en nivå under insatsnivån. Olika avstånd mellan och olika tjocklekar på skärmlinorna har simulerats med verktyget FEMLab. Fyra av dessa skärmlinavstånd har även provats praktiskt. Då det är en komplicerad uppgift att mäta elektriska fält har också sätt att modifiera det mätinstrument som används behandlats.

Genom att placera en jordad plåt ovanpå mätinstrumentet utjämnas fältförstärkningen kring instrumentet och överskattningen av fältet minskas. Vid mätningar minskades mätresultaten i snitt med 17 % när den jordade plåten användes. Simuleringar och mätningar stämmer väl överens vid jämförelse.

Det maximala fältet i ställverket uppmättes till 13.4 kV/m. Men en vajerdiameter på 5 mm och ett skärmlinavstånd på 10 dm reducerades detta värde till 5.1 kV/m, vilket motsvarar 61.9 % av det ursprungliga värdet. Detta värde ligger under insatsnivån 10 kV/m.



## Tack

Vi vill rikta ett stort tack till alla dem som hjälpt oss genomföra det här examensarbetet:

Kjell Hertzberg, Hasse Törnqvist, Christer Van Den Berg och framförallt Jan-Börje Mårtensson i ställverket i Stenkullen som hjälpte oss med allt från mätning, bygge och material till svar på frågor och rundvisningar

Tack också till Lennart Darell, Chalmers, för hjälp med mätplåten, Yuriy Serdyuk, Chalmers, för hjälp med FEMLab, Kjell-Åke Persson, Svenska Kraftnät, för handledningen och Mikael Persson, Chalmers, för ditt ifrågasättande. Stort tack till Yngve Hamnerius för att du tagit dig tid att svara på våra frågor.

Dessutom tack till Camilla och Simon för ert varma stöd efter leriga mätdagar.

Tack!



## **Innehållsförteckning**

<b>SAMMANFATTNING</b>	<b>III</b>
<b>TACK</b>	<b>V</b>
<b>INNEHÅLLSFÖRTECKNING</b>	<b>VII</b>
<b>1 INLEDNING</b>	<b>1</b>
<b>2 SYFTE OCH MÅL</b>	<b>2</b>
<b>3 BAKGRUND</b>	<b>3</b>
<b>4 GRUNDLÄGGANDE TEORI OCH TEKNIK</b>	<b>6</b>
<b>4.1 Elektromagnetiska fält</b>	<b>6</b>
4.1.2 Biologiska effekter av elektromagnetiska fält	6
4.1.3 Skärmning av magnetiska och elektriska fält	7
<b>4.2 Ställverk</b>	<b>8</b>
<b>5 METOD</b>	<b>9</b>
<b>5.1 Mätinstrument</b>	<b>9</b>
<b>5.2 Modifiering av mätinstrument</b>	<b>10</b>
<b>5.3 Simuleringsverktyget FEMLab</b>	<b>11</b>
<b>6 MÄTOMRÅDEN</b>	<b>13</b>
<b>6.1 Mätområde 1</b>	<b>13</b>
<b>6.2 Mätområde 2</b>	<b>14</b>
<b>6.3 Mätpunkt i ställverket</b>	<b>15</b>
<b>7 RESULTAT</b>	<b>16</b>
<b>7.1 Mätningar och simuleringar utan skärmning</b>	<b>16</b>
7.1.1 Simuleringar utan skärmning	16
7.1.2 Mätningar, mätområde 1 och 2	18
7.1.3 Jämförelse mätningar och simuleringar	20
7.1.4 Felanalys	22
7.1.4.1 Lågt batteri i mätinstrumenten	22
7.1.4.2 Mätinstrumentets känslighet	22
7.1.4.3 Temperatur och last	22

7.1.4.4 Lutning på mätinstrumentet	22
7.1.4.5 Placering av plåt	22
7.1.4.6 Perfekt ledande jord i simuleringarna	23
7.1.4.7 Lutande mark i simuleringarna	23
7.1.4.8 Buskar och träd i närheten	23
7.1.5 Slutsats mätningar och simuleringar utan skärm	23
<b>7.2 Mätningar och simuleringar med skärmning</b>	<b>24</b>
7.2.1 Val av skärningsmetod	24
7.2.2 Simuleringar av olika skärmningar	24
7.2.2.1 Val av dimension på skärmlinor	25
7.2.2.2 Val av avstånd mellan skärmlinor	25
7.2.2.3 Resultat simuleringar med skärmning	26
7.2.3 Mätningar med skärmlinor	29
7.2.3.1 Stomme för skärmlinor	29
7.2.3.2 Resultat i stomme 1, 5x5x3 m	29
7.2.3.3 Resultat stomme 2, 5x10x3 m	30
7.2.3.4 Slutsats, stomme 1, 5x5x3 m och stomme 2, 5x10x3 m	31
<b>7.3 Skärmning av elektriskt fält inne i ställverket</b>	<b>33</b>
7.3.1 Resultat skärmning inne i ställverket	34
<b>7.4 Skärmlinor som nät</b>	<b>35</b>
<b>7.5 Människa i under skärmningen</b>	<b>35</b>
<b>8 ALTERNATIVA METODER FÖR UPPFYLLANDE AV DIREKTIVET</b>	<b>37</b>
<b>8.1 Skyddskläder</b>	<b>37</b>
<b>8.2 ”Säkrade” områden och nybyggnationer</b>	<b>37</b>
<b>9 DISKUSSION</b>	<b>38</b>
<b>REFERENSER</b>	<b>41</b>
<b>BILAGA A</b>	
<b>BILAGA B</b>	

## 1 Inledning

Europaparlamentet och Europeiska rådet antog ett direktiv 2004/40/EG av den 29 april 2004 gällande maximala nivåer på elektromagnetiska fält i arbetsplatser. Medlemsländerna har fyra år på sig att uppfylla kraven ställda i direktivet. Av de ställverk som används i Sverige idag uppfyller inte alla dessa krav. Det är alltså av stor vikt att reduktion av elektriska fält i befintliga ställverk sker, men också att nybyggnationer planeras för att undvika att överträda de i direktivet satta insatsnivåerna och gränsvärdena. Svenska Kraftnät har ett 400 kV-ställverk i Stenkullen utanför Göteborg där nybyggnationer kommer att göras. På grund av EU-direktivet vill Svenska Kraftnät undersöka hur reduktion av de elektriska fälten kan göras. Enligt Jenny Åke och Johanna Frackes arbete (2004) kring samma ställverk framgår att de magnetiska fälten är tillräckligt låga för att klara insatsnivåerna uppsatta i direktivet, men att det elektriska fälten är för höga.

## 2 Syfte och mål

Rapporten ska frambringa ett eller flera olika sätt på hur de lågfrekventa elektriska fälten kan reduceras i ställverk så att EU-direktivets uppsatta gränsvärden och insatsnivåer för elektriska fält för yrkesexponering klaras. Målet innefattar även att simuleringar tillsammans med utförda mätningar ska ge ökad tillförlitlighet för mätresultaten. Dessutom utvärderas mätinstrument och mätmetoder för elektriska fält, då det idag finns få dokumenterade metoder att mäta elektriska fält i detta frekvensområde. Förslagen ska vara behjälpliga till Svenska Kraftnäts förstudie om ombyggnation av 400 kV-ställverket i Stenkullen, men också för andra ställverk.

### 3 Bakgrund

I slutet av april 2004 antogs ett direktiv av europaparlamentet och europeiska unionens råd, 2004/40/EG av den 29 april 2004 "om minimikrav för arbetstagares hälsa och säkerhet vid exponering för risker som har samband med fysikalisk agens (elektromagnetiska fält) i arbetet". Kravet på direktiv på europainivå ställdes redan 1993. Sedan antagandet av direktivet har medlemsländerna fyra år på sig att genomföra kraven, det vill säga fram till våren 2008. Syftet är bland annat att "främja förbättringar av arbetsmiljön, för att garantera en högre skyddsnivå för arbetstagarnas hälsa och säkerhet" (Europaparlamentet, 2004).

Under arbetes gång med direktivet har hjälp tagits från International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, ICNIRP, som har lång samlad erfarenhet av ämnet i fråga. ICNIRPs funktion är att undersöka farorna med olika sorter av ickejoniserande strålning, utveckla olika gränsvärden för exponering och arbeta med frågor rörande skydd av denna strålning. De gränsvärden och insatsnivåer som är satta i direktivet är framtagna av ICNIRP (1998).

Direktivet gäller den hälso- och säkerhetsrisk som arbetstagare utsätts för på grund av kortsiktiga, kända, ogynnsamma effekter på kroppen, det vill säga sådana som orsakats av inducerade strömmar, energiabsorption och kontaktströmmar. Direktivet innefattar inte långsiktiga effekter, då det inte anses finnas några avgörande vetenskapliga bevis för orsakssamband mellan till exempel exponering för elektromagnetiska fält och cancer.

De gränsvärden och insatsvärden som är givna i direktivet är för elektromagnetiska fält på 50 Hz för yrkesverksamma och allmänheten. Allmänhetens insatsvärden för elektriska fält är satta med en faktor 5 under insatsvärden för yrkesverksamma. Insatsvärden för elektriska fält är på samma sätt ändrat med en faktor 2, eftersom risken för kontakt med elektriskt laddade ledare har uteslutits för allmänheten. Insatsvärden för de elektriska och magnetiska fälten är beräknade utifrån gränsvärdena för strömtäthet.

Grupp / Exponering	Elektriska fält [kV/m] insatsvärden	Magnetiska fält [µT] insatsvärden	Strömtäthet [mA/m <sup>2</sup> ] gränsvärde
Yrkesverksamma	10	500	10
Allmänheten	5	100	2

Tabell 3.1: Gränsvärden och insatsvärden givna i direktivet, 50 Hz  
Källa: Europaparlamentet, 2004

I Jenny Åke och Johanna Frackes arbete (2004, s. 34) i 400 kV-ställverket i Stenkullen utanför Göteborg, mättes de elektriska och magnetiska fälten samt den inducerade strömmen i kroppen. Deras resultat visade att de magnetiska fälten är tillräckligt låga för att klara de i direktivet uppsatta insatsvärdena. Däremot överskrider det elektriska fältet insatsnivån 10 kV/m i många mätpunkter och högsta uppmätta värdet var 17.94 kV/m. I det högsta uppmätta elektriska fältet mättes en medelströmtäthet i anklarna

motsvarande 192 % av gränsvärdet, men gränsvärdet avser strömtätheten i huvudet och bålarna och därför kan ingen slutsats dras innan en simulering har gjorts. De har också i sitt arbete påpekat en brist i mätningen av elektriska fält. Instrumentet sticker upp 12 cm från marken då det placeras på plan mark, vilket leder till en överskattning av fältstyrkan på ungefär 40 %. Därför har visst utrymme i den här rapporten getts åt mätinstrument och korrekt mätning.

Inte många undersökningar om skärmningar av elektriska fält har gjorts, då fokus har legat på de magnetiskafälten och dess biologiska effekter. Dock finns ett fåtal rörande skärmning av elektriska fält från kraftledningar och skyddskläder.

Hanafy M. Ismail (1999, s.198), har i sin konferensartikel "Shielding Design Methods for Kuwait High Voltage Double Circuits Electrical Networks" skärmat av elektriska fält med hjälp av horisontella respektive vertikala parallella jordade linor från transmissionsledningar. Han har funnit diametern på linorna inte hade någon större relevans, medan antalet linor och deras placering i höjd och avstånd från transmissionsledningen spelade stor roll.

B.Dubek (1990, s. 211-13), konstaterar i sin konferensartikel "Protection Measures Against the Effect of the 50 Hz Electric Fields" att yrkesfolk i polska 400 kV och 750 kV-ställverk och andra arbetsplatser med hög spänning utsätts för högre elektriska fält än det gränsvärde på 10 kV/m som den polska staten har satt. B. Dubek har delat upp de olika skyddsalternativen i tre grupper, de fasta skärmningarna, de flyttbara skärmningarna och skyddskläder.

Jenny Åke och Johanna Fracke (2004, s. 34) har i sitt examensarbete ("Magnetiska och elektriska fält i ställverksmiljö: kartläggning av en äldre anläggning") genomfört mätningar på elektromagnetiska fält och ström-i-kroppen-mätningar i Stenkullens 400 kV ställverk. I sin rapport har de dragit slutsatsen att de magnetiskafälten kommer att klara gränsvärdena satta av EU-direktivet, men att de elektriskafälten är för höga. De har p g a svårigheter med korrekt mätning av de elektriskafälten fått en eventuell överskattning på upp till 40 % av värdena, men eftersom de elektriskafälten överstiger insatsnivån med ca 80 %, räknar de ändå med att insatsnivån överstiger vid en korrigering. Deras mätningar på ström i kroppen överstiger insatsnivån med 192 % och de föreslår simuleringar för beräkningar av strömtätheten i centrala nervsystemet för att se en överskridning av den grundläggande begränsningen finns. De föreslår vidare reduktion av de elektriskafälten med hjälp av jordade linor, plåtar eller nät på lämplig höjd.

I K. G. Lövstrand och Sven Bergströms (1980, s. 17, 20-24) undersökning "Exposition för elektriska fält – En kartläggning av den elektrofysikaliska arbetsmiljön i ställverk" har en kartläggning av elektriska fältstyrkor i 20 olika ställverk gjorts. Mätningar gjordes både i låg- och högbyggda 400 kV-ställverk. Dessutom har en kartläggning av elektriska fältstyrkor inom arbetsområdena genomförts. Mätapparaturen som användes hade tidigare beskrivits av K. G. Lövstrand. I ett högbyggt 400 kV-ställverk uppmättes fältstyrkor på stora områden mellan 10-15 kV/m och knappt några områden

med högre fältstyrkor än 15 kV/m. I det lågbyggda 400 kV-ställverket var däremot areorna med fältstyrkor på 10-15 kV/m mindre, men områden med 15-20 kV/m är fler och även områden med högre fältstyrkor än 20 kV/m uppmättes. De högsta fältstyrkorna, 21 kV/m, uppmättes vid vissa fränksiljare och något lägre fält, som inte översteg 15 kV/m, mättes vid brytare. De elektriskafälten i 200 kV-ställverk uppgick till halva värdet av de i 400 kV anläggningarna och inga värden över 10 kV/m uppmättes där. Då arbete pågick ett fack i 400 kV-ställverket, mättes låga fältstyrkor i arbetsområdet. Fältstyrkan överskred inte 5 kV/m på marken omkring det fränskilda facket. Vid arbete på marken med fränskilda brytare avskärmar dessa arbetsområdet, men vid arbete ovanpå brytare, på ungefär åtta meters höjd, sker ingen avskärmning och fältet förstärks.

Ventakeswarlu and Narayana Rao (1995) har beskrivit ett sätt att mäta skärmningseffektiviteten för skärmning av elektriska fält. De har mätt skärmningseffekten hos hel aluminiumplåt, perforerad aluminiumplåt och hel skärm av ledande polymermaterial. De har kommit fram till att helt aluminium skärmar mycket bra, endast 1,8 % av det infallande fältet kommer igenom plåten. En perforerad aluminiumplåt släpper igenom 8 % och den ledande polymeren 15 %.

Udod et al beskriver (1995) olika metoder för att skydda yrkesarbetande mot exponering av höga elektriska och magnetiska fält. De anser att det mest effektiva och billigaste sättet att skydda mot höga elektriska fält är genom effektiva skyddskläder. De presenterar en metod att räkna på hur effektivt kläderna skärmar. Kläderna de räknar på har ett nät av ledande linor i tyget som skärmar fältet. De kommer fram till följande slutsatser, vad gäller elektriska fält:

- Alla klädesplagg behöver inte ha samma skärmningseffekt.
- Maximal skärmningseffekt bör finnas i huvan, axelpartiet, armbågar, knän, baksidan av byxorna, handskar och strumpor.
- Maximal skärmningseffekt kan fås genom att använda flera lager av tyg som har jämförelsevis låg skärmningseffekt.
- För att minska elektrisk resistans mellan olika klädesplagg/material är det bra att sätta strömledande band i sömmarna.
- Användandet av syntesisk strömledande tråd istället för metalltråd kan förenkla designen för strömledande tyg avsevärt.

## 4 Grundläggande teori och teknik

Nedan presenteras grundläggande teori inom elektromagnetik och en redogörelse för hur ställverk är uppbyggda, för att öka förståelsen för rapportens ämne.

### 4.1 Elektromagnetiska fält

Mellan två parallella ledande skivor med olika potential, kommer ett elektriskt fält att uppträda. Om skivorna är stora i förhållande till avståndet emellan dem kommer den elektriska fältstyrkan bli lika stor som spänningen delat på avståndet mellan skivorna. Ett elektriskt fält utövar en kraft på en elektriskt laddad partikel och fältstyrkan uttrycks som spänning per meter (V/m) kallad E. Elektriska fält har både en storhet och en riktning och kan således sägas vara vektorer. Den elektriska fältbilden påverkas av objekt med annan permittivitet än mediet. Om objektets permittivitet är högre, t ex människokroppen, kommer det elektriska fältet att koncentreras runt objektet och en fältförstärkning uppstår.

Elektriska fält associeras enbart med laddningar, medan magnetiska fält handlar om den fysiska rörelsen hos laddade partiklar, det vill säga ström. Magnetiska fält uttrycks som fältstyrka, ström per meter (A/m) kallad H, eller som magnetisk flödestäthet, Tesla (T) kallad B. Förhållandet dem emellan kan skrivas  $B = \mu \cdot H$  där  $\mu$  är den magnetiska permeabiliteten. I de flesta fall när magnetiska fält behandlas, talas det om magnetfältet B. Liksom det elektriska fältet är även det magnetiska fältet en vektor. Det magnetiska fältet roterar runt en strömförande ledare och har slutna fältlinjer. Den magnetiska fältbilden påverkas inte av objekts olika permittivitet, utan permeabilitet,  $\mu$ . Endast vissa metaller har ett  $\mu$ -värde som skiljer sig mycket från  $\mu_0$ , permeabiliteten i vakuum. Den magnetiska fältstyrkan i t ex en människokropp är alltså lika stor utanför som i.

Starka 50-periodiska elektriska och magnetiska fält uppträder under kraftledning och i högspänningsanläggningarna som har de högsta spänningsnivåerna. Det elektriska fältet från en kraftledning beror på spänningen och inte direkt av lasten, men då lasten varierar ändras strömmen och därmed temperaturen på ledningen. Vid olika temperaturer ändras kraftledningens nedhäng, d v s avståndet till marken varierar, och den elektriska fältstyrkan på marken ändras. Det magnetiska fältet beror på strömmen och varierar om lasten ändras.

I ett elektromagnetiskt växelfält induceras strömmar av de båda fälten i en ledande kropp. Det magnetiska fältet ger upphov till cirkulerande strömmar i kroppen, då man kan se människokroppen som en ledande kropp bestående av oändligt många slutna slingor. Det elektriska fältet å sin sida, ger upphov till strömmar vars riktning växlar fram och åter mellan t ex huvud och fötter. Ett växelfält på 50 Hz motsvarar 100 ändringar per sekund.

#### 4.1.2 Biologiska effekter av elektromagnetiska fält

Undersökningar av lågfrekventa elektriska fält, 50 Hz, har inte utförts i större utsträckning, utan tonvikt har lagts på de magnetiska fälten och dess biologiska påverkan. Den mänskliga kroppen är en komplex skapelse med en mängd olika egenskaper. På grund av detta är det svårt att fastställa hur

stor påverkan på människokroppen elektromagnetiska fält har och hur det tidsvarierande elektromagnetiska fältet interagerar med människokroppen. ICNIRP har delat in de sätt som kroppen påverkas i tre olika fall: Effekter av lågfrekventa elektriska fält, effekter av lågfrekventa magnetiska fält och energiabsorption från elektromagnetisk strålning. Energiabsorption beskriver hur mycket effekt kroppen absorberar och ger upphov till temperaturhöjningar. För referensvärden framtagna för yrkesarbetande har även hänsyn till så kallad kontaktströmmar tagits. Kontaktström är den ström som uppstår i människokroppen då den är i kontakt med två föremål med olika potential och alltså utgör ledare mellan dessa två objekt. (Poljak, 2004)

De omedelbara effekterna på människokroppen beror på vilken frekvens fältet har. Vid fält under 1 Hz finns en hjärt- och kärlpåverkan samt en påverkan på det centrala nervsystemet. Från 1 Hz till 10 MHz påverkas nervsystemet. Vid fält mellan 100 kHz och 10 GHz absorberar kroppen så mycket energi att det uppstår helkroppsvärmebelastning och lokal uppvärmning av vävnad. I frekvensområdet 10 GHz till 300 GHz uppstår värmning av vävnad på eller nära kroppsytan. I området som behandlas i denna rapport, 50 Hz / 60 Hz, påverkas det centrala nervsystemet. Hur stor påverkan är beror på hur hög den inducerade strömmen i kroppen är. Effekterna för olika strömtätheter i kroppen beskrivs i tabellen nedan. (Poljak, 2004)

Strömtäthet [mA/m <sup>2</sup> ]	Effekter
1000 och högre	Lätta till allvarliga hjärtproblem, akut fara för hälsan.
100 till 1000	Irritation på muskelvävnader har påträffats.
10 till 100	Tydliga effekter som ändringar i protein och DNA-sammansättning, ändringar i enzymaktiviteter, påtaglig visuella och möjliga nervösa effekter.
1 till 10	Subtila biologiska effekter såsom förändringar i kalcium metabolism eller minskning av melatonin produktion (Melatonin kontrollerar dag/natt- rytmen). Hjärtats och hjärnans bakgrundströmtäthet ligger i detta område.
Under 1	Inga kända effekter. Bakgrundströmtätheten i de flesta av kroppens organ ligger i detta område.

Tabell 5.1: Olika strömtätheters effekt på människokroppen.

Källa: (Poljak, 2004)

### 4.1.3 Skärmning av magnetiska och elektriska fält

Reducering av elektriska och magnetiska fält görs med hjälp av olika metoder som i princip går ut på att eliminera orsaken till fälten; att välja utrustning som ger små fält, motverka fälten eller skärmning.

Skärmning av dessa två olika fält skiljer sig åt. Magnetfält är mycket svårare att skärma av än det elektriska fältet, eftersom det kan passera genom skärmningsmaterialet. Det finns två principiellt olika sätt att minska de magnetiska fältens spridning. Den ena tekniken går ut på att kapsla in källan med en metall med hög magnetisk ledningsförmåga, t ex så kallad  $\mu$ -metall. De magnetiska fältlinjerna viker då av och följer metallen istället för att

fortsätta ut på andra sidan. Den andra tekniken är att kapsla in källan med metall med god ledningsförmåga. Magnetfältet uppväcker virvelströmmar i metallen, vilka i sin tur ger upphov till ett magnetfält som motverkar det ursprungliga fältet och på så sätt motverkar fälten varandra och en dämpande effekt uppnås. Vid skärmning av magnetfält skärmas också det elektriska fältet, men då tekniken för skärmning av magnetfält är mer avancerad och betydligt dyrare än för det elektriska fältet, används annan teknik för skärmning av det elektriska fältet.

Då den elektriska fältbilden påverkas av objekt med annan permittivitet i fältet används Faradays bur, som är en bur gjord av ledande material, för skärmning av elektriska fält. Jordade metallnät eller linor av metall kan tjäna detta syfte och de elektriska fältlinjerna viker av och följer metallen. Placeras linorna tillräckligt tätt, eller om nätet är finmaskigt nog, kan en skärmningseffekt uppnås liknande om plåt hade använts.

## 4.2 Ställverk

Ett ställverk är en fördelningsstation bestående av flera samlingskenor och mot dessa flera vinkelrätt placerade fack för distribution av effekten. Facken har tre faser, R, S och T. 400 kV-ställverket i Stenkullen har tre utgående, tre inkommande och två kopplingsfack, vilka används för ihopkoppling av de tre samlingskenorna. Varje fack har hänglinor, en för varje fas, som är placerade 19 m över marken. För vardera av dessa faser finns en brytare och en frånskiljare. De tre samlingskenorna kallas A-, B- och C-skenan där C-skenan är reserv och bara används när A- eller B-skenan tas ur drift. B- och C-skenan har även de hänglinor placerade på 9,6 m höjd, medan A-skenan har en konstruktion av ett aluminiumrör på 6,9 m höjd. På metallstativ står stödisolatorer och ovanpå är brytare och frånskiljare monterade. Brytarna används för att bryta kortslutningsströmmar och lastströmmar. Isoleringen i brytarna finns i olika utföranden såsom SF<sub>6</sub>, vakuum eller olja. Frånskiljarna används vid arbeten i ställverket för att göra vissa delar spänningslösa och klarar inte att bryta kortslutningsströmmar. Dessutom finns ström- och spänningstransformatorer för mätning av ström och spänning. (Åke och Fracke, 2004, s. 4-5)

## 5 Metod

Arbetetsgången bestod av simuleringar i programmet FEMLab av elektriska fält och praktiskt utförda mätningar. Mätning och simulering av en kraftledning, på två olika platser, utanför ställverket i Stenkullen, gjordes först för att se hur väl de uppmätta värdena stämde överens med de simulerade. Genom jämförelser av dessa resultat från simuleringar och mätresultat kunde olika felkällor upptäckas och analyseras. Resultaten redovisas i två olika avsnitt; Mätningar och simuleringar utan skärmning och med skärmning. Sedan simulerades olika skärmningar och några av dessa provades praktiskt där de första mätningarna gjordes och det elektriska fältet mättes. Olika reduceringar av det elektriska fältet beräknades för olika skärmningar. Därefter användes en skärmning inne i ställverket på den plats där Åke och Fracke (2004, s. 34) uppmätte de högsta värdena. Där mättes det elektriska fältet och värdet jämfördes sedan med ett värde som beräknats från skärmningar gjorda utanför ställverket.

Genom att simulera kraftledning och skärmningar, ges ett mer säkert resultat än om endast mätningar görs. När arbetsmetoden bara består av mätningar kan inga jämförelser mellan teoretiska och praktiska värden göras och resultatet är helt beroende av mätsäkerheten hos instrumentet. Två simuleringar och mätningar gjordes på samma kraftledning, men i olika spann och utan skärmning. Vid jämförelse mellan uppmätta och simulerade värden är det viktigt att simuleringen är så lik verkligheten som möjligt. För att kunna simulera så korrekt som möjligt valdes mätområden med en geometri som är relativt enkel att simulera.

De två olika mätplatserna benämns mätområde 1 och mätområde 2 och ligger under samma 400 kV-ledning. De båda mätområdena är jämn åkermark och ligger i mitten av respektive spann. På grund av sin enkelhet geometrin är de relativt enkla att simulera.

Olika skärmningar simulerades och vid område 1 testades fyra olika av dessa. Två olika ställningar i trä användes för fastsättning och jordning av skärmlinorna. Vid simuleringarna testades olika tjocklekar på skärmlinorna och olika avstånd dem emellan. Olika reduceringar av det elektriska fältet beräknades för olika skärmningar. Därefter användes en skärmning inne i ställverket på den plats där Fracke och Åke (2004, s. 34) uppmätte den högsta elektriska fältstyrkan, se karta i bilaga B, och det elektriska fältet mättes. Det uppmätta värdet jämfördes med ett värde beräknat genom användning av mätningarna utförda för olika skärmningar utanför ställverket.

### 5.1 Mätinstrument

Mätinstrumentet är av typen EMM-4 från EnviroMentor AB. Instrumentet är lånat från Svenska Kraftnät har från början ett mätområde upp till 2 kV/m, men har efter ombyggnad ett mätområde upp till 20 kV/m. Mätinstrumentet har en osäkerhet på +/- 0.002 kV/m +3 % av avläst värde och klarar mätningar i temperaturer mellan -10 °C och +50 °C.

Mätresultaten kan relateras genom en obruten kedja av jämförelser från

EnviroMentor ABs kalibreringssystem, till FFV Mätteknik ackrediterade av SWEDAC, till Sveriges provnings- och forskningsinstitut. (EnviroMentor AB, 1998)

Mätsonden består av en skiva av glasfiberlaminat belagd med koppar. Det elektriska fältet som faller in mot mätytan ger upphov till en ström,  $i$ . Strömmen omvandlas till en spänning,  $u$ , i en integrerad ström/spänningsomvandlare enligt ekv. (1) och blir därmed proportionell mot det elektriska fältet,  $E$ . Efter filtrering går signalen till RMS-omvandlaren som bildar effektivvärdet av signalen enligt ekv. (2). (EnviroMentor, 1998)

$$u = \int \frac{i}{C} dt \quad (1)$$

$$u_{\text{eff}} = \sqrt{\int u^2 dt} \quad (2)$$

Alla dagar mätningar har utförts har en kontrollpunkt mätts, för att kontrollera att mätinstrument mäter lika. Kontrollpunkten har legat 25 m från mittfasen på inkommande ledning 2. Denna plats påverkades inte av skärmningen. De variationer av den elektriska fältbilden som uppstår vid olika temperaturer är mycket små. Det uppmätta elektriska fältet i denna punkt har varit lika, eller varierat mycket lite, vid alla mättillfällen bortsett från den 24:e november 2004. Denna dag låg drygt en decimeter snö och det var  $-8$  °C kallt. Vid kontrollmätningen varierade värdet så pass mycket att inget pålitligt resultat kunde utläsas.



Bild 5.1: Instrumentet som användes vid mätningarna

## 5.2 Modifiering av mätinstrument

Jenny Åke och Johanna Fracke (2004, s. 34) har i sitt exjobb konstaterat en eventuell överskattning på det mätta elektriska fältet på upp mot 40 %, då mätinstrumentet placeras så att det sticker upp från marken, se bild 5.1, jämfört med om det är nedgrävt i höjd med marken. Detta beror på att instrumentet har högre permittivitet än luften omkring och det elektriska fältet koncentreras runt instrumentet. Med en sådan överskattning av resultaten blir mätvärdena missvisande och inga närmre slutsatser kan dras. Det är därför av stor vikt att de uppmätta värdena kan sättas i relation med värden framtagna på annat sätt, t ex simulerade värden. Det är också viktigt att den eventuella överskattningen kan minskas genom ändring av mätinstrumentet eller mätrutinerna. Med en placering av ett större jordat plant föremål, t ex en plåt, uppe på instrumentet ändras fältbilden då en

förstärkning kring själva instrumentet inte uppträder på samma sätt som tidigare. Det elektriska fältet jämnas ut över plåten och överskattningen kan minskas. Därför placerades en jordad, kvadratisk, galvad stålplåt, med tjockleken 1 mm, över mätinstrumentet med ett utstansat hål i mitten för mätytan på instrumentet. Plåten var 1 m i kvadrat, d v s ungefär tre gånger längden av in-strumentets diameter och hålet mätte 127 mm i diameter, vilket är något större än mätinstrumentets mät-yta, se bild 5.2.



Bild 5.2: Minskad fältförstärkning med jordad plåt.

### 5.3 Simuleringsverktyget FEMLab

Programmet FEMLab, Finite Element Modeling Laboratory, används för simuleringar. I detta programsystem kan alla olika fysikaliska processer som beskrivs med partiella differentialekvationer modelleras och simuleras. Programmet är uppdelat i olika arbetsområden som löser de ekvationer som är relevanta för just det område som valts. Egna ekvationer kan även definieras och olika arbetsområden kan blandas i en och samma simulering.

För varierande elektromagnetiska fält är det elektriska fältet beroende av det magnetiska fältet, i stationära elektromagnetiskt fält är fälten inte kopplade till varandra. Vid väldigt låg frekvens och för fält där våglängden är mycket större än dimensionerna i modellen, kan dock det elektriska fältet antas vara oberoende av det magnetiska fältet. Det kvasistationära tillståndet i FEMLab kan användas för fält som uppfyller dessa krav. Här antas det elektriska fältet vara oberoende av det magnetiska, men till skillnad från det stationära tillståndet kan tidsberoende simuleringar göras och material med olika ledningsförmåga kan simuleras.

När det elektriska fältet inte är beroende av det magnetiska fältet ekv. (3) leder detta till att det elektriska fältet kan uttryckas genom den elektriska potentialen  $E$ , ekv. (4). Genom att sedan kombinera den tidsharmoniska kontinuitetsekvationen ekv. (5), med ekv. (6) och ekv. (7) fås ekv. (8), där det elektriska fältet kan beräknas med känd potential.

$$\nabla \times E = 0 \quad (3)$$

$$E = -\nabla V \quad (4)$$

$$\nabla \cdot J = \nabla(\sigma E + J^e) = -\omega \rho \quad (5)$$

*J*, strömtäthet  
*σ*, ledningsförmåga  
*J<sup>e</sup>*, yttre genererad strömtäthet  
 $\omega = 2\pi f$

$$D = \varepsilon_0 E + P \quad (6)$$

*D*, elektrisk förskjutning,  
 elektrisk flödestäthet  
*ε*, permittivitet  
*P*, polarisationsvektor

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (7)$$

*ρ*, laddningstäthet

$$-\nabla \cdot ((\sigma + j\omega\varepsilon_0)\nabla V - (J^e + j\omega P)) = 0 \quad (8)$$

Källa: D. K. Cheng (1994)

De lösningsmetoder som används i FEMLab bryter alltid ner problemen till ett eller flera linjära system, detta kan göras iterativt eller direkt. De direkta lösarna använder sig av gausselimination. Det är en pålitlig och stabil metod som dock kräver mer minne och ibland mer tid än en iterativ lösare. FEMLab anger automatiskt den algoritm som generellt fungerar för övriga inställningar. Som linjär parametrisk lösare för 2D, kvasistatiska arbetsområdet i elektromagnetikmodulen, anges UMFPACK som förvald lösningsmetod. UMFPACK är en linjär, direkt lösningsmetod för osymmetriska system. Den löser även symmetriska problem men tar längre tid än en algoritm anpassad för symmetri. Rutnätet genereras automatiskt i hela geometrin. Längs den sträcka där det elektriska fältet ska tas fram förfinas rutnätet ytterligare.

## 6 Mätområden

Två områden valdes för mätning och simulering av det elektriska fältet. Områdena ligger utanför ställverket, under samma 400 kV-ledning, se karta nedan. Områdena valdes på grund av sin enkla geometri vilket underlättade genomförandet av simuleringarna.



Bild 6.1: Karta över mätområde 1 och 2.

### 6.1 Mätområde 1

Mätområde 1 ligger mitt i spannet mellan stolparna 652 och 653 på inkommande ledning 2 till 400 kV-ställverket i Stenkullen. Marken är relativt jämn åkermark utan större växtlighet. Terrängen intill är ojämn och bevuxen med höga träd och buskar. De mått som på kraftledningen som användes vid simuleringen skiljde sig från stolpe 652 och 653. Eftersom mätningarna utfördes i mitten av spannet togs ett medelvärde av de båda värdena. Se tabell 6.1.

Mått [mm]	Mitten av spannet	Stolpe 653 (närmast stv.)	Stolpe 652
Radie på faslinor:	15.85	15.85	15.85
Duplex, Avstånd mellan samma fas:	450	450	450
Mellan faserna:	11000	11000	11000
Mellan topplinor:	11500	11000	12000
Radie på topplinor:	10.05	10.05	10.05
Mellan topplinor och faslinorna:	8865	8210	9520
Höjd ovan mark, vid +15 °C	16800	N/A	N/A

Tabell 6.1: Mätområde 1: Mått på ink. kraftledning 2

Vid sidan av denna kraftledning, nästan 25 meter bort löpandes parallellt, fanns ytterligare en 400 kV-ledning, något högre placerad. Den togs med i simuleringarna, se tabell 6.2. Avstånden gäller från ytterfasen på ink ledning 2 och är mätta vid -8 °C. Placeringen av faserna på inkommande ledning 1 är i samma ordning som på inkommande ledning 2, vilket gör att de elektriska fälten motverkar varandra och den elektriska fältbilden totalt sett minskas.

Avstånd	Mått [mm]
Ytterfas ink 1 -ytterfas ink 2	24400
Ytterfas ink 1 - topplina ink 2	27200
Höjdskillnad mark, mittfas ink 1 – mittfas ink 2	2000
Höjdskillnad ytterfas, ytterfas ink 1 – ytterfas ink 2	1500
Höjdskillnad topplinor, topplina ink 1 – topplina ink 2	1500
Avstånd mellan faserna	12000
Avstånd mellan topplinorna	12000

Tabell 6.2: Mätområde 1: Mått på ink. kraftledning 1

## 6.2 Mätområde 2

Mätområde 2 ligger i spannet mellan stolpe 651 och 652 på samma kraftledning. Marken är jämn åkermark och inkommande ledning 1 är längre bort och påverkar inte fältet i samma utsträckning som vid mätområde 1. Mätningarna utfördes på samma sätt som vid mätområde 1, på en sträckning på 20 meter. 35.3 m bort från mittfasen fanns en kabel uppsatt på åtta meters höjd, se bild 6.2. Kabeln skärmade det elektriska fältet från kraftledningen, därför gjordes även en mätning på denna plats.



Bild 6.2: Mätområde 2: Stolpe 651, inkommande ledning 2 till vänster, inkommande ledning 2 till höger och kabel på åtta meters höjd.

Måtten på kraftledningen i detta spann mättes samma dag och presenteras nedan, se tabell 6.3.

Mått [mm]	Mitten av spannet
Radie på faslinor:	15.85
Duplex, Avstånd mellan samma fas:	450
Mellan faserna:	12000
Mellan topplinor:	12000
Radie på topplinor:	10.05
Höjd mellan topplinor och faslinorna:	12050
Höjd ovan mark, vid -8 °C	25170

Tabell 6.3: Mätområde 2: Mått på ink. kraftledning 2

### 6.3 Mätpunkt i ställverket

Enligt Fracke och Åke (2004) uppmättes det högsta elektriska fältet under A-skenans R fas och mellan R och S fas i inkommande fack 3. Värdet uppgick till 17.94 kV/m och på samma ställe den 28:e oktober 2004 uppmättes det elektriska fältet till 17,5 kV/m utan plåt. Skillnaden mellan resultaten ligger inom mätosäkerheten för instrumentet. Med plåt uppmättes det elektriska fältet till 13,6 kV/m. Användning av plåten ger en minskning med 22 %, men värdet överstiger fortfarande insatsnivån på 10 kV/m. För att värdena ska understiga 10 kV/m krävs en minskning av det elektriska fältet på ungefär 27 % eller mer.

## 7 Resultat

Nedan presenteras resultaten från mätningar och simuleringar gjorda både med och utan skärmning.

### 7.1 Mätningar och simuleringar utan skärmning

Mätningarna utfördes vid olika tillfällen, men på samma sätt. Första mätpunkten placerades rakt under mittfasen och därefter placerades mätpunkterna med en meters mellanrum, på en 20 meters sträckning, vinkelrätt ut från kraftledningens mittfas. Eftersom symmetri råder kan den totala elektriska fältbilden under kraftledningen fås genom spegling av resultatet.

#### 7.1.1 Simuleringar utan skärmning

Det kvasistationära tillståndet för små strömmar valdes då simuleringen ska utföras för den låga frekvensen 50 Hz och dimensionerna i den uppbyggda modellen är mycket små i jämförelse med våglängden. Simuleringen utfördes i 2D, då geometrin är möjlig att skapa i 2D.

De två olika mätområdena simulerades efter måtten på kraftledningen angivna i tabellerna 6.1, 6.2 och 6.3. Kraftledningen ritades upp inuti en 400 m lång och 200 m hög box. Ledarna gavs randvillkoret elektrisk potential, med potentialen  $V = V_0 \cos(2\pi ft + \varphi)$  och fasförskjutningen  $\varphi = 0, 2\pi/3, 4\pi/3$ , mellan de tre olika faserna R, S och T.

För en kraftledning med den effektiva spänningen 400 kV från fas till fas, blir toppspänningen från fas till jord:

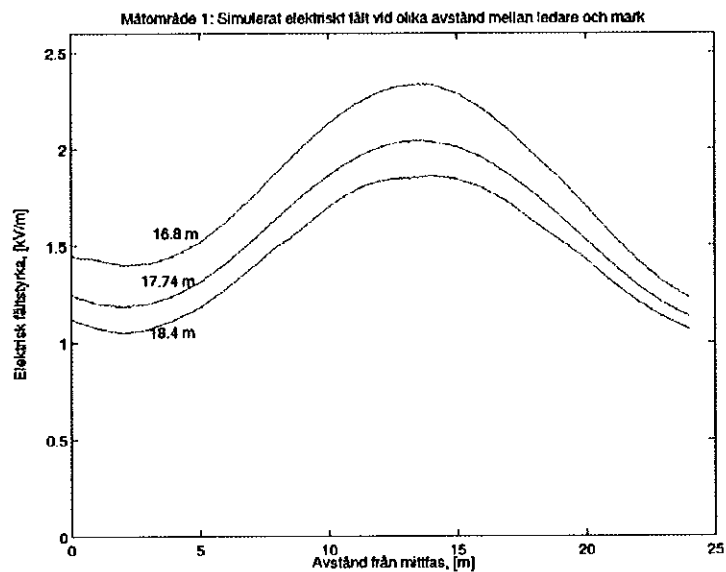
$$V_0 = V_{fas-eff} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 400 \text{ kV} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 327 \text{ kV}$$

Materialet inuti ledningarna ignoreras då det är dess potentialer som är det relevanta vid beräkning av kvasistationära elektriska fält, där strömmarna inte inverkar på resultatet.

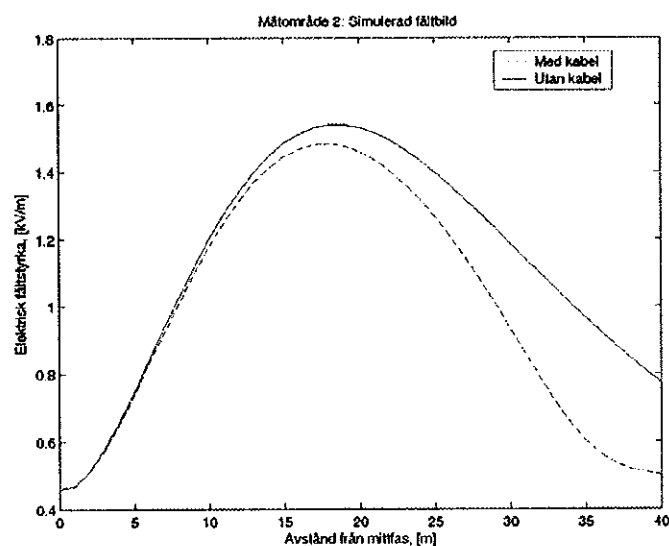
Botten av boxen är jordytan som antas vara perfekt ledande, randvillkoret sätts därför till jord med potentialen noll. Även topplinorna ges randvillkoret jord. De övriga tre sidorna på boxen ges randvillkoret elektrisk isolering, vilket innebär att den elektriska förskjutningen är noll utanför randen och som också är det villkor som används då den elektriska potentialen är symmetrisk vid randen. Boxen fylls sedan med ett material som har den relativa permittiviteten ett och ledningsförmågan noll, vilket är respektive värde för luft. Resultaten av simuleringarna redovisas med effektivvärdet av det elektriska fältet längs marken, på samma sätt som mätningarna utfördes. Simuleringen görs för en period, T, med steglängden T/100. I redovisningarna av resultatet används Y-komponenten av det elektriska fältet, eftersom fältet infaller vinkelrätt mot jordplanet och X-komponenten således är noll. Det elektriska fältet i varje punkt längs jordplanet bildar rena sinusvågor. Effektivvärdet för en ren sinuskurva beräknas enligt  $E_{\max}/\sqrt{2}$ .

I figur 7.1 visas det simulerade elektriska fältet för mätområde 1 vid tre olika avstånd mellan ledning och mark. Höjden beror på ledningens ytemperatur, dvs dels luftens temperatur men även strömmens storlek. De tre höjderna mättes upp vid olika tillfällen under perioden oktober till december, 2004. Simuleringarna visar att det elektriska fältet på markplan påverkas i stor grad av avståndet mellan spänningsatt ledare och mark.

I figur 7.2 visas det simulerade elektriska fältet för mätområde 2. Den undre kurvan visar det elektriska fältet när en kabel 35.3 m från mittfasen, på 8 m höjd är medtagen i simuleringen. Det syns här hur ett föremål, likt kabeln, trycker ned det elektriska fältet i området den befinner sig och även minskar toppen på kurvan. På grund av att simuleringarna gjordes i 2D är kabeln simulerad parallellt med kraftledningen.



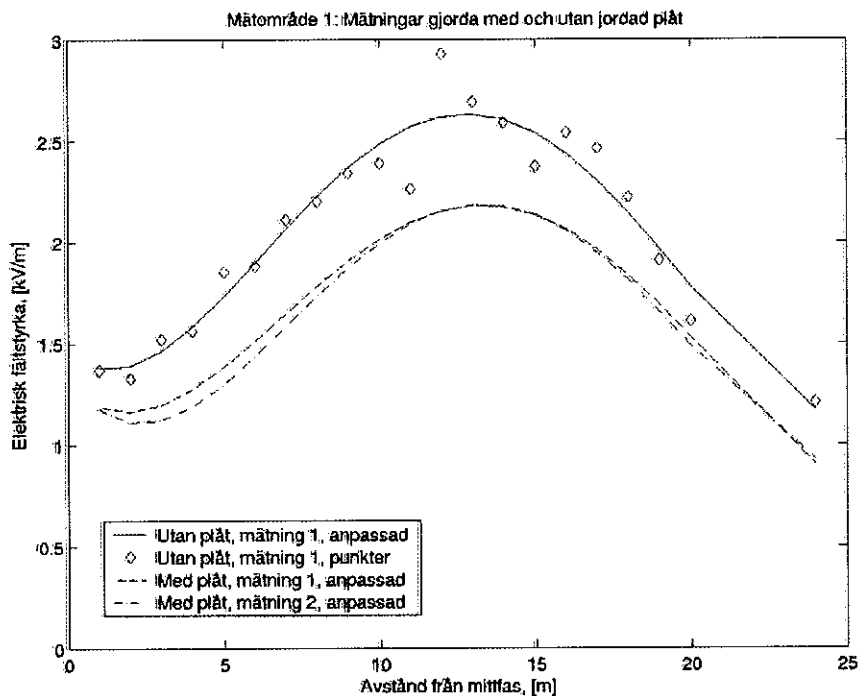
Figur 7.1: Det simulerade elektriska fältet i mätområde 1, för tre olika ledningshöjder; 16.8, 17.74 och 18.4 m



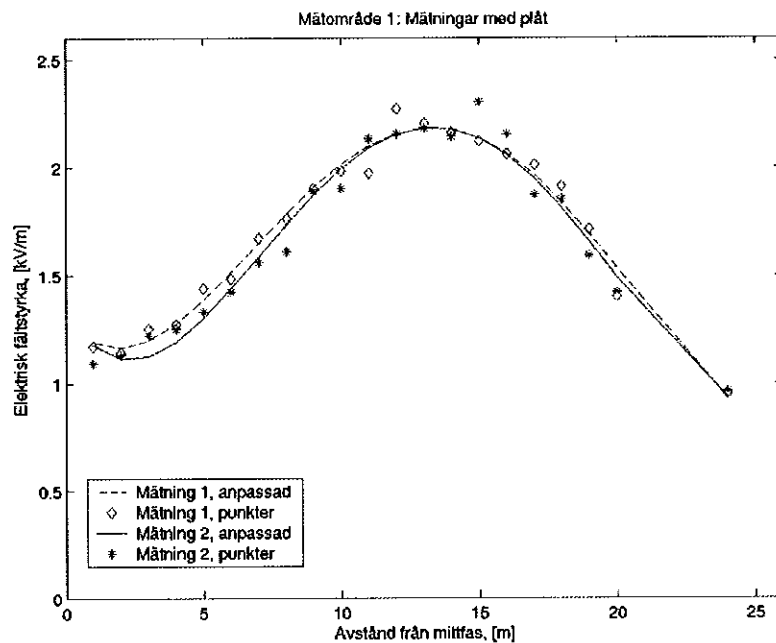
Figur 7.2: Det simulerade elektriska fältet för mätområde 2, med och utan den på åtta meters höjd placerade kabeln.

### 7.1.2 Mätningar, mätområde 1 och 2

Under det första mättillfället, den 11:e oktober 2004, gjordes mätningar i mätområde 1 både med och utan den jordade plåten, se figur 7.3 och 7.4. Ytterligare en mätserie gjordes med plåt i mätområde 1 den 28:e oktober 2004, se figur 7.3. I figur 7.3 nedan visas för tydlighetens skull endast mätpunkterna för mätningen utan jordad plåt. Mätpunkterna för de två mätningarna som gjordes med den jordade plåten visas i figur 7.4. En användning av den jordade plåten minskade det uppmätta resultatet med i medel 17 %. Mätresultatet visade också en jämnare mätserie då plåt användes. De enskilda mätvärdena finns redovisade bilaga A.

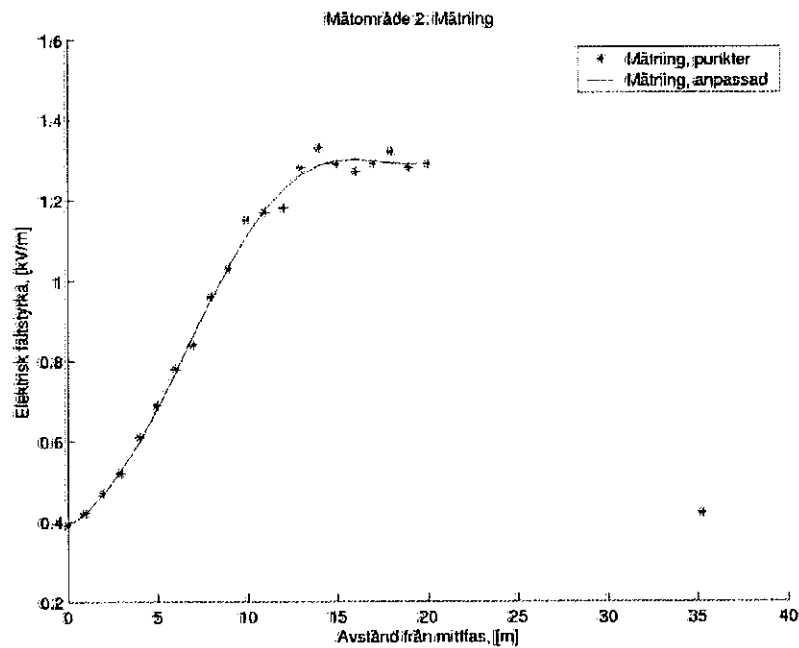


Figur 7.3: Det uppmätta elektriska fältet i mätområde 1. Två mätningar med, och en mätning utan den jordade plåten. För tydlighetens skull var mätpunkterna för mätningarna med plåt ej ritats in. Dessa visas i figur 7.4.



Figur 7.4: Det uppmätta elektriska fältet i mätområde 1. Mätpunkter vid två olika mätningar med den jordade plåten

Mätningar gjordes med plåt i mätområde 2 den 24:e november vid  $-8^{\circ}\text{C}$ . Avståndet mellan ledning och markplan mättes i samband med mätningen av det elektriska fältet. Vid detta tillfälle låg drygt en decimeter snö och när instrumentet, skyddat med plast, placerades med plåt på marken låg den jordade plåten i jämnhöjd med snötäcket. Då ledningens nedhäng mättes vid detta tillfälle och snön gjorde att plåt och mätyta på instrumentet låg i nivå med markytan, borde en överskattning av det elektriska fältet i det här fallet vara försumbar. Efter 12 mätpunkter började instrumentet ge opålitliga värden, se figur 7.5.

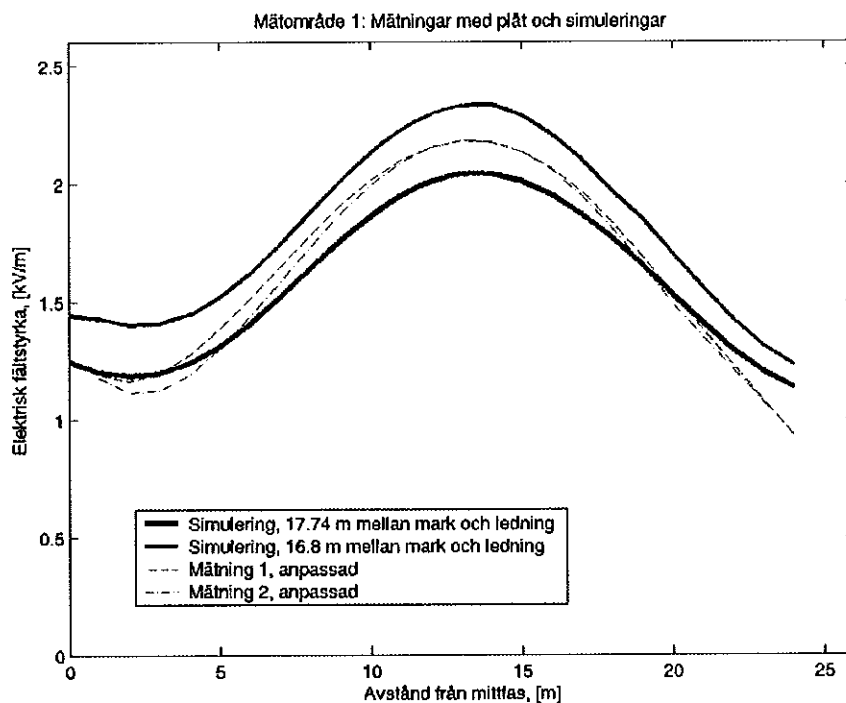


Figur 7.5: Det uppmätta elektriska fältet i mätområde 2, med mätpunkter.

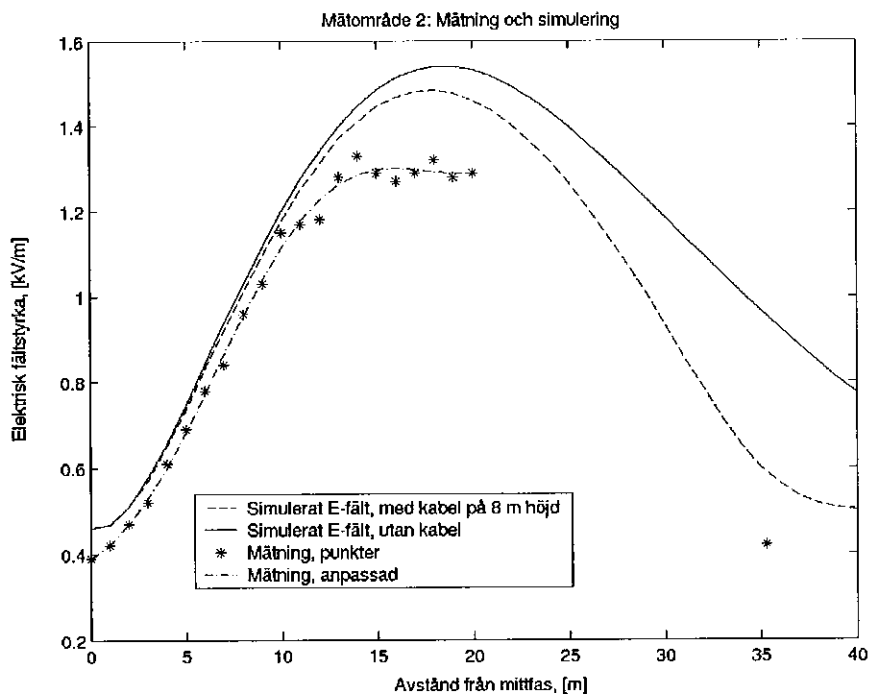
### 7.1.3 Jämförelse mätningar och simuleringar

I figur 7.6 och 7.7 visas resultaten över simuleringar och mätningar i mätområde 1 och 2. Överlag stämmer de simulerade och uppmätta värdena väl överens i mätområde 1. I figur 7.6 ses att längst ut från mittfasen är de simulerade värdena högre än de uppmätta vilket kommer an på att mätpunkten var placerad nära träd som ändrade fältbilden. Denna växtlighet var inte med i simuleringen. Två olika höjder på ledningen i mätområde 1 är simulerade eftersom den exakta höjden inte mättes vid mättillfället

I figur 7.7 ses att de uppmätta och simulerade värdena stämmer väl överens de första 12 mätpunkterna, d v s från noll till elva meter. Därefter började instrumentet att ge mycket osäkra värden och inga slutsatser mellan simulerade och uppmätta värden kan därför dras.



Figur 7.6: Det simulerade elektriska fältet för två olika höjder på ledningarna och det uppmätta elektriska fältet i mätområde 1. De två mätningarna med den jordade plåten visas.



Figur 7.7: Det simulerade och uppmätta elektriska fältet i mätområde 2.

#### **7.1.4 Felanalys**

Uppmätta och simulerade värden av det elektriska fältet stämmer relativt väl överens, men vissa skillnader finns. Genom att ändra förutsättningarna vid mätningarna och simuleringarna kan vissa felkällor avfärdas och större vikt läggas vid andra.

##### **7.1.4.1 Lågt batteri i mätinstrumenten**

För att kontrollera de värden instrumentet ger vid lågt batteri, sattes både mätinstrument 1 och mätinstrument 2 bredvid varandra vid en tänd lampa. Under några timmar kontrollerades resultaten ungefär var 10:e minut. Även då batterierna var svaga ändrades inte resultaten. Av detta försök kan slutsatsen dras att batterierna inte har någon inverkan på resultatet.

##### **7.1.4.2 Mätinstrumentets känslighet**

Den 24:e november 2004 var det  $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$  kallt och drygt en dm snö. Efter nästan en timmes mätning i mätområde 2 under ink kraftledning 1, började mätresultaten variera beroende på hur voltmetern under vilket tryck kontaktarna hölls. Mätning vid kontrollpunkten visar ytterligare variationer i mätresultaten. En möjlig förklaring är instrumentets känslighet för fukt och kyla. Instrumentet ska klara mätningar ned till  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Lufttemperaturen var  $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , men temperaturen på marken kan ha varit lägre. Temperaturen vid denna mätning var alltså nära gränsen för vad mätinstrumentet klarar av.

##### **7.1.4.3 Temperatur och last**

Då metall värms upp expanderar den, vilket leder till att ledningens avstånd till marken varierar med ledningens temperatur. Ledningen kan bli uppvärmd av antingen höga strömmar, det vill säga hög last, eller höjd lufttemperatur. Då alla mätningar inte har gjorts vid samma mättillfälle är detta en högst trolig källa till varierande mätresultat.

Under de olika mättillfällena har temperaturen varit drygt  $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$  som högst och  $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$  som lägst. Nedhänget i mitten av spannet mättes vid tre olika tillfällen. Temperaturerna var vid dessa tillfällen  $+15$ ,  $+7$  och  $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$  och avstånden från marken till faslinan mättes då upp till 16.8, 17.74 och 18.4 m vid respektive mättillfälle, se figur 7.1. Simuleringar utfördes med de olika avstånden till marken och av resultaten ses att fältbilden ändras markant med avståndet.

##### **7.1.4.4 Lutning på mätinstrumentet**

Under första mättillfället mättes det elektriska fältet med mätinstrumentet med och utan plåt pålagd. Instrumenten placerades så plant som möjligt, men instrumenten lutade ibland något. För att kunna utesluta att detta påverkade resultaten testades olika lutningar på instrumentet. När instrumentet utan plåt pålagd lutade påverkades resultatet mer än om plåten var pålagd, men de variationer som uppstod var små och det blev inga större skillnader i resultaten.

##### **7.1.4.5 Placering av plåt**

Under mätningarna med och utan plåt, användes plåten vid hälften av mätningarna. Under resten av tiden lades denna på marken intill mätinstrumentet. Mätningar gjordes både när plåten låg nära och när den

flyttades en bit bort från mätpunkten. De olika placeringarna av plåten inverkad inte på resultatet.

#### 7.1.4.6 Perfekt ledande jord i simuleringarna

I simuleringarna antogs jorden vara perfekt ledande, d v s ledningsförmågan antas vara oändlig. Den elektriska fältbilden under en högspänningsledning ändras med jordens elektriska egenskaper, såsom ledningsförmåga och permittivitet. Då ledningsförmågan minskar, minskar även maxvärdet i fältbilden. Vid mycket låg ledningsförmåga minskar även det maximala fältet med permittiviteten (Abd-Allah M. A., 1999, s. 730-733).

Ett ledande skikt med jordad botten lades in i simuleringen. Simuleringar gjordes med varierande ledningsförmåga och permittivitet i det ledande skiktet och det visades att fältbilden ändrades först vid ledningsförmåga ner mot  $10^{-7}$  S/m. Enligt Cheng D. K (1994, appendix) är ledningsförmågan för torr jord  $10^{-5}$  S/m och ju fuktigare jord desto högre är ledningsförmågan. Vid jämförelse mellan de uppmätta och de olika simulerade fallen ses att simuleringarna stämmer bättre överens med mätningarna då perfekt ledande jord antas.

#### 7.1.4.7 Lutande mark i simuleringarna

Marken antogs jämn och helt horisontell under kraftledningen, trots att den i verkligheten lutade en aning uppåt från första mätpunkten till sista. Ett fall med lutande mark simulerades. Marken gavs en lutning med höjdskillnad 0.5 m, från första mätpunkten till sista, d v s 20 m. Detta resulterade i att fältbilden blev osymmetrisk. Efter jämförelse sågs att justeringen av marken inte ledde till att den simulerade fältbilden stämde bättre överens med den uppmätta.

#### 7.1.4.8 Buskar och träd i närheten

I mätområde 1 var mätplatsen åkermark, men 25 m från mittfasen, det vill säga 14 m från ytterfasen, låg en väg och därefter var en upphöjning i terrängen med höga träd och buskar, se bild 6.1. Liksom en människa påverkar det elektriska fältet, gör också växtlighet det, så det elektriska fältet är lägre där träd och buskar växer i närheten. Detta kan förklara de lägre värden som mättes längst ut från mittfasen, se figur 7.6.

#### 7.1.5 Slutsats mätningar och simuleringar utan skärm

Simuleringarna och mätningarna i mätområde 1 och 2 stämmer väl överens. Instrumentet gav med den jordade plåten ett resultat som i medel var 83 % av värdet mätt utan plåt. Plåten åstadkom alltså en reducering med 17 %. Mätinstrumentet har en inbyggd osäkerhet på +/- 3 % av avläst värde vilket bör beaktas. Vid jämförelse med de simulerade värdena för samma område, ses att vid mätning utan den jordade plåten är mätresultaten högre. Slutsatsen som kan dras är att en användning av den jordade plåten ger ett resultat som stämmer bättre överens med de simulerade värdena.

Resultatet av mätningarna och simuleringarna i mätområde 1 visar att de simulerade värdena är högre än de uppmätta. Innan denna mätning mättes inte den exakta höjden på ledningarna och beroende på temperaturen ändras nedhänget mitt i spannet. Hade en mätning av höjden skett samma dag hade en mer exakt miljö kunnat simuleras. De låga uppmätta värdena längst ut i mätområdet kommer an på den höga växtligheten strax intill, vilket påverkar fältbilden. Denna växtlighet är inte simulerad, varför skillnaden mellan de

uppmätta och de simulerade värdena är som störst just här.

Resultatet av mätningarna och simuleringarna i mätområde 2 visar en mindre skillnad mellan de värdena de simulerade och uppmätta värdena än i mätområde 1. Detta kan komma an på att den exakta höjden på kraftledningen i mätområde 2 mättes samma dag som mätningarna utfördes och att snötäcket var så tjockt att den eventuella överskattningen av det elektriska fältet kring mätinstrumentet troligtvis var låg. Efter den elfte mätpunkten varierar de mätta värdena mycket och skillnaden mellan dessa värden och de simulerade värdena blir större. Detta kommer antagligen på mätinstrumentets känslighet för kyla och fukt.

De värden som avviker i de gjorda mätningarna kan inte komma från svaga batterier, lutande instrument eller placeringen av plåten på marken intill. Även om resultaten ändrades vid lutande instrument var avvikelserna liten. I simuleringarna ändrades markens lutning men inte heller detta förbättrade jämförelsen. Däremot spelar temperaturen på ledarna, vilket i sin tur påverkas av lasten och lufttemperaturen, stor roll för nedhänget mitt i spannet. Efter justeringar av höjden på ledarna mitt i spannet stämmer de simulerade och uppmätta värdena bättre överens. Höjden mättes vid olika lufttemperaturer och på olika dagar.

## 7.2 Mätningar och simuleringar med skärmning

Reducering av elektriska fält görs med hjälp av olika metoder som i princip går ut på att eliminera orsaken till fälten, att välja utrustning som ger små fält eller motverka fälten, d v s skärmning.

### 7.2.1 Val av skärningsmetod

Val av skärningsmetod beror på olika faktorer. Det handlar bl a om säkerhet, ekonomi och rimlighet. H. M. Ismail (1999) har använt sig av jordade linor vid skärningsförsök. Det är ett enkelt sätt att använda jordade vajrar, det skärmar det elektriska fältet effektivt och är dessutom billigare och enklare att använda än t ex jordad plåt. För att säkerheten ska vara så hög som möjligt krävs dock att linorna, eller vajrarna, och fastsättningen, har tillräckligt hög hållfasthet då vädret kommer att påverka dem. Samtidigt bör skärmningen vara relativt enkel att ta bort när arbete med t ex skylift behövs, men detta är problem vars lösningar inte tas upp i den här rapporten. Skärmlinorna som används är passiva, d v s de är jordade.

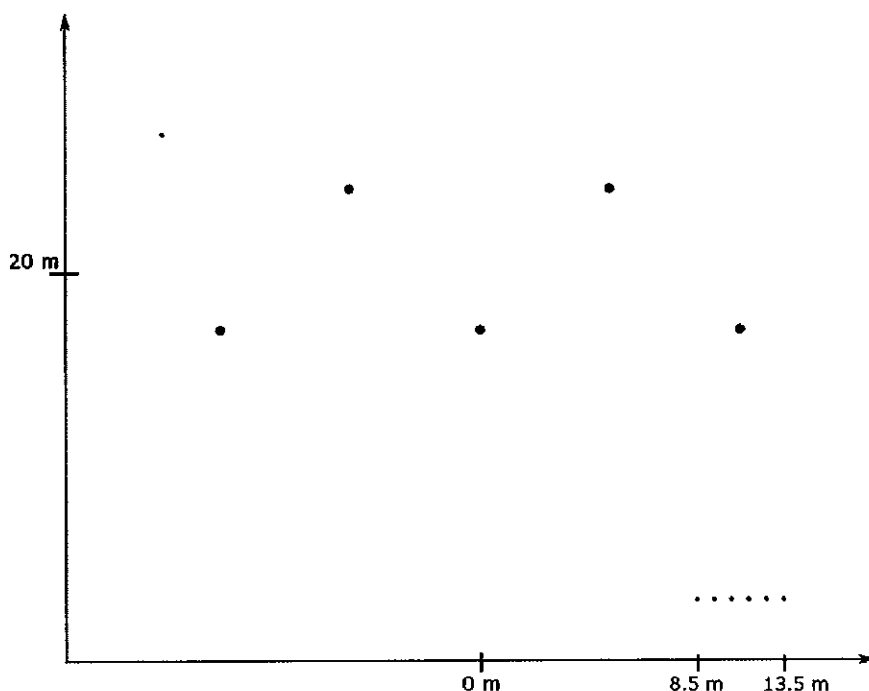
### 7.2.2 Simuleringar av olika skärmningar

De jordade skärmlinorna placerades parallellt på en fem meter lång linje på tre meters höjd. Eftersom simuleringarna är gjorda i 2D, ses skärmningen som parallella jordade punkter på tre meters höjd. Simuleringen utförs på samma sätt som de utan skärm.

Simuleringar gjordes med två aspekter; dels den jordade vajerns diameter och dels avståndet dem emellan. Tre olika vajerdimensioner simulerades, 1,5, 5, och 10 mm. Avståndet mellan dem varierades med en decimeters steg, från 1 dm till 10 dm. Dessutom gjordes simuleringar med skärmlinjeavstånden 12 och 16 dm. Dessa avstånd valdes efter antalet

skärmlinor och dess placering.

Vid en jämförelse mellan olika vajerdimensioner är det av intresse att se hur det elektriska fältet ändras dels mitt under skärmningen och dels vid ändarna av den fem meter breda skärmningen. I simuleringen finns ingen fästanordning simulerad, vilket gör att fältet inte påverkas av t ex reglar och fästpunkter.



Simuleringsbild 7.1: Skiss över simulerad kraftledning och skärmning. Mittfas vid 0 m, högra ytterfasen vid 11 m. Skärmningens bredd: 5 m. Dimensionerna i skissen är inte skalenliga.

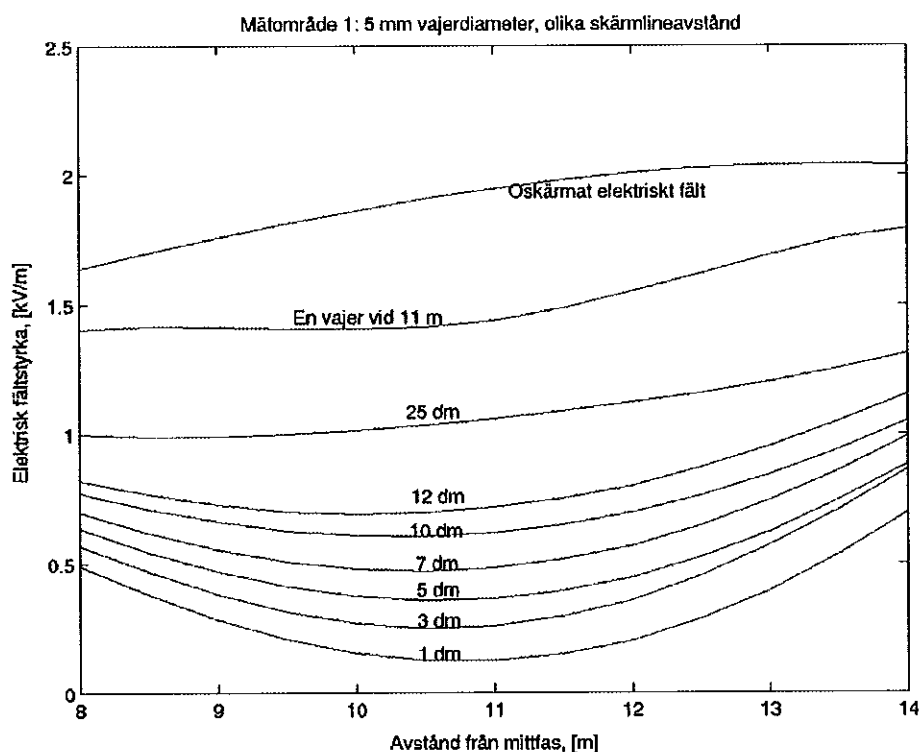
### 7.2.2.1 Val av dimension på skärmlinor

För det praktiska utförandet av skärmningen användes en av de tre vajerdimensionerna. Valet av vajerdimensionen grundades på hållfasthet, pris och hur lätthanterlig vajern var. Det är viktigt att vajrarna som används har tillräckligt hög hållfasthet och klarar olika sorters påfrestningar. Även om en skärmvajer med en diameter på 1.5 mm är billigast av de tre dimensionerna, så är en diameter på 1.5 mm för lite för att klara t ex isbildning. En vajerdiameter på 5 eller 10 mm är därför lämpligt. Eftersom vajern skulle böjas till en ögla vid fästpunkten valdes vajerdiametern 5 mm då den var mer lätthanterlig än en vajerdiameter på 10 mm. Priset per meter för 5 mm 72-trådig vajer var 10.23 kr och för 10 mm 144-trådig vajer 18.40 kr

### 7.2.2.2 Val av avstånd mellan skärmlinor

I direktivet står följande ”Med beaktande av de tekniska framsteg och tillgängliga åtgärder för att påverka en risk vid källan, skall de risker som härrör från exponering för elektromagnetiska fält elimineras eller nedbringas till lägsta möjliga nivå”. Dessutom står det att ”Om de insatsvärden som avses i artikel 3 överskridits skall arbetsgivaren /.../

utarbete och genomföra en handlingsplan /.../ med särskilt beaktande av tekniska åtgärder, så att de elektromagnetiska fälten kan minskas, om nödvändigt genom användning av spärranordningar, avskärmning eller liknande hälsoskyddsmekanismer”. (Europaparlamentet, 2004). Insatsnivån tolkas här som den elektriska fältstyrkan i ett ostört fält. Enligt mätningar inne i ställverket så ska det elektriska fältet minskas med minst 27 % för att det elektriska fältet ska understiga 10 kV/m. Då direktivet använder uttryck som “elimineras” och “nedbringas till lägsta möjliga nivå” är en större reduktion av det elektriska fältet än dessa 27 % önskvärdt. För en vajerdiameter på 5 mm ses i figur 7.8 hur det elektriska fältet ändras vid olika avstånd mellan skärmlinorna. Samma figur visar också det elektriska fältet i mätområde 1. I figuren ses att en placering av skärmlinorna på upp till en meters avstånd minskar fältet mycket väl, både i mitten av skärmningen och vid ändarna. I figuren börjar skärmningen vid 8.5 m och slutar vid 13.5 m. Skärmningens mittpunkt är rakt under kraftledningens ytterfas, dvs 11 m från mittfasen.



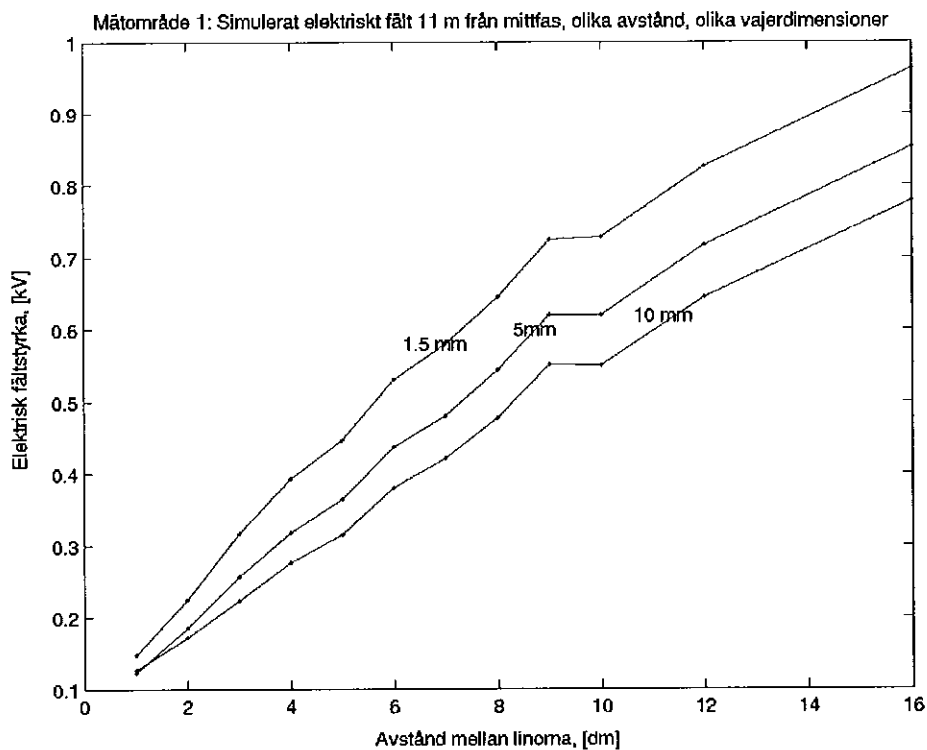
Figur 7.8: Det simulerade elektriska fältet i mätområde 1 och olika skärmlinavstånd med vajerdimensionen 5 mm.

### 7.2.2.3 Resultat simuleringar med skärmning

I figur 7.9 ses att vid korta avstånd mellan skärmlinorna är skärmningen för de tre olika dimensionerna i stort sett lika, medan det är först vid större avstånd som en skillnad gör sig gällande. Likheten mellan vajeravstånd 9 och 10 dm förklaras på detta sätt: Eftersom avståndet som ska skämmas är fem meter, används samma antal skärmlinor, 6 st, vid ett skärmlinavstånd på 9 som på 10 dm. Det medförde olika bredd, från första skärmlinan till den sista. Smalare skärmning ger större fält från sidorna. Om skärmningen hade gjorts oändligt bred hade resultaten i figur 7.9 varit mer linjära.

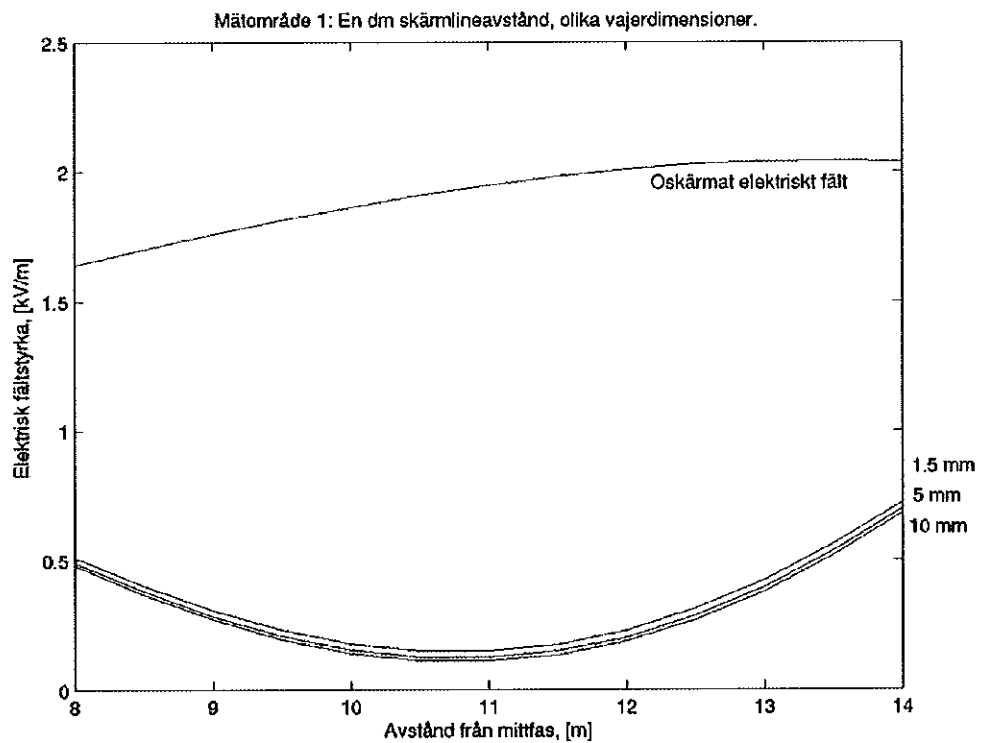
Figur 7.10 visar att skärmningens effektivitet i stort sett inte alls påverkas av vajerdiametern vid korta avstånd mellan skärmlinorna. Vid större avstånd mellan skärmlinorna påverkas resultatet av diametern på skärmlinorna, men påverkan är fortfarande inre stor, se figur 7.11.

Från dessa simuleringar ses att avståndet mellan skärmlinorna är av större betydelse än tjockleken på vajrarna. Detta innebär att en skärmning med större diameter på vajern skulle kosta mer än en skärmning av samma grad med tunnare diameter. Valet av dimension föll på vajern med en diameter på 5 mm, på grund av hållfasthet, hanterlighet och pris. De avstånd mellan skärmlinor som testades praktiskt var 3, 5, 7 respektive 10 dm. Alla dessa avstånd minskar det elektriska fältet tillräckligt mycket både i mitten och vid ändarna av skärmningen.

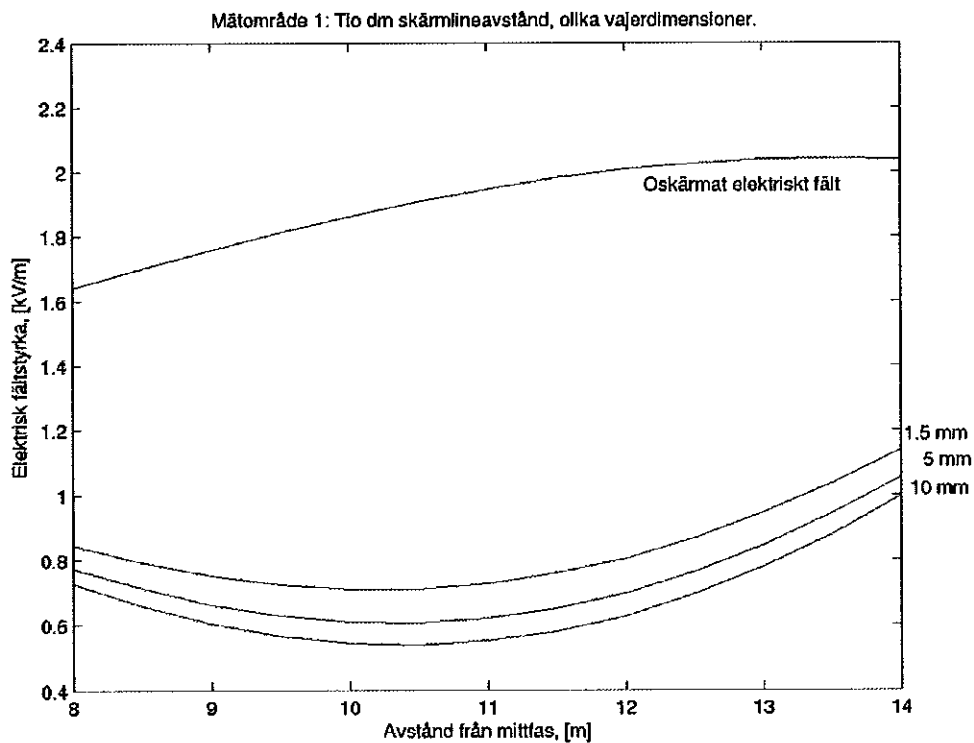


Figur 7.9: Det simulerade elektriska fältet i mätområde 1 för olika vajerdimensioner och olika skärmlinavstånd.

## Reducering av elektriska fält i ställverksmiljö



Figur 7.10: Det simulerade elektriska fältet i mätområde 1 med ett skärmlineavstånd på 1 dm och tre olika vajerdimensioner. Skärmningen sträcker sig från 8.5 m till 13.5 m.



Figur 7.11: Det simulerade elektriska fältet i mätområde 1 med ett skärmlineavstånd på 10 dm och tre olika vajerdimensioner. Skärmningen sträcker sig från 8.5 m till 13.5 m.

### 7.2.3 Mätningar med skärmlinor

Mätningarna med skärmlinor gjordes i slutet av november och början av december 2004. Under två olika måttillfällen testades fyra olika skärmlineavstånd på vardera två olika stommar där skärmlinorna fästes. Dessa mätningar gjordes på mätområde 1 mellan stolpe 652 och 653. Därefter användes en av de två olika stommarna till att skärma den högsta uppmätta punkten inne i ställverket.

#### 7.2.3.1 Stomme för skärmlinor

För att kunna genomföra en skärmning praktiskt, användes en stomme av trä där de olika skärmlinorna fästes. Stommen placerades under kraftledningen, med dess mittpunkt under den yttersta fasen och med skärmlinorna i samma sträckning som kraftledningen. Mittpunkten i stommen finns med i de mätningar gjorda utan skärmning och kallas då för mätpunkt 12, på elva meters avstånd från mittfasen. Två olika stommar med olika utseende och mått användes vid skärningsförsöken, som påverkade det elektriska fältet olika mycket. Som fästen för skärmlinorna slogs spikar fast med en decimeters avstånd överst på stommens gavlar. En vajer lindades så att alla spikarna hade kontakt med den, varefter ena änden på vajern jordades nere på marken. På vardera änden av skärmlinorna gjordes en ögla som sedan hakades fast på spikarna.

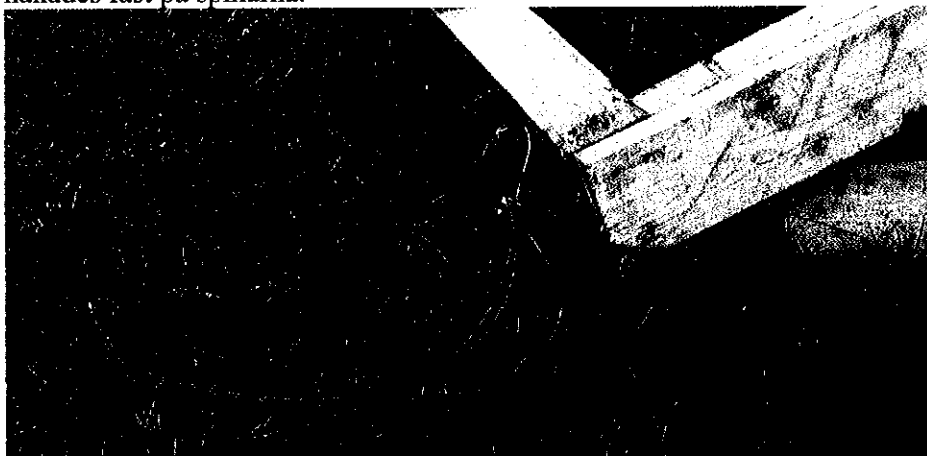


Bild 7.1: Jordning av skärmlinor när stomme 2 är nedfälld.

#### 7.2.3.2 Resultat i stomme 1, 5x5x3 m

Stommen var gjord av trä, fem meter bred, fem meter lång och tre meter hög. Denna storlek visade sig påverka det elektriska fältet mitt i stommen mycket mer än förutsett, trots att endast några reglar höll ihop konstruktionen. Den 28:e oktober 2004, mättes det elektriska fältet utan stomme i mätpunkt 12 till 2.15 kV/m. I samma punkt mättes den 26:e november 2004 det elektriska fältet, mitt i stommen, endast till 0.9 kV/m. Enbart stomme 1 reducerade det elektriska fältet i mätpunkt 12 från 2.15 kV/m till 0.9 kV/m, vilket motsvarar nästan 60 %. Det regnade när stommen byggdes och träet hann inte torka innan mätningarna gjordes. En fuktig stomme har högre ledningsförmåga och skärmar mer än en torr stomme.

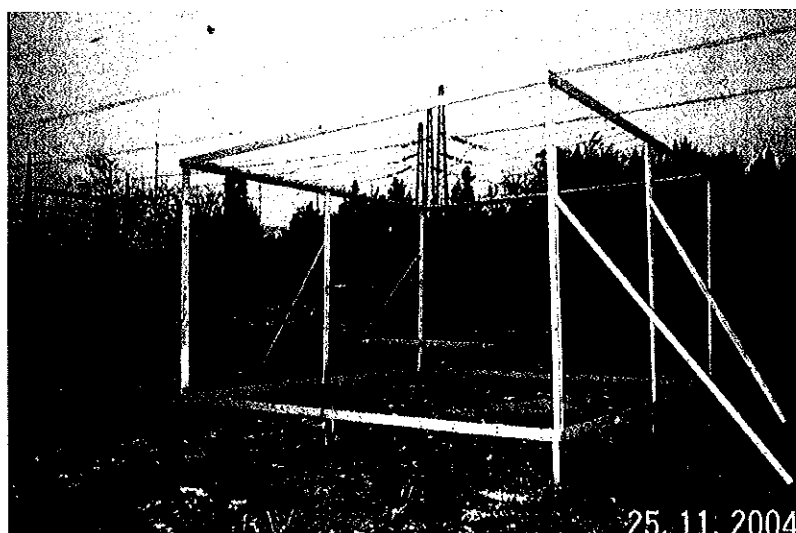


Bild 7.2: Stomme 1, 5x5x3 m, i mätområde 1.

Datum: 041126	Uppmätt värde i mitten, mätpunkt 12	
Skärmlineavstånd	Elektriskt fält [kV/m]	Reducering [%]
Helt utan stomme, 041028	2.15	0
Utan skärmlinor i stommen	0.9	58
3 dm	0.29	87
5 dm	0.36	83
7 dm	0.44	80
10 dm	0.53	75

Tabell 7.1: Resultat, stomme 1, 5x5x3 m

### 7.2.3.3 Resultat stomme 2, 5x10x3 m

Stomme 2 var också gjord av trä, fortfarande fem meter bred och tre meter hög, men tio meter lång. Fästpunkter, jordning skärmlinorna var likadana som vid försöken med stomme 1. Till skillnad från stomme 1 var denna fällbar och gavlarna var helt skiljda från varandra. Genom en sådan konstruktion kunde påverkan från sidoreglar på det elektriska fältet.

undvikas och simuleringarna blev mer lik verkligheten, men även denna stomme var fuktig i träet. Skärmningar och mätningar utfördes i denna stomme den 1:a december 2004. Mätvärdet i mitten av den nedfällda stommen var 2.23 kV/m vilket kan jämföras med samma mätvärde den 28:e oktober 2004 som då uppgick till 2.15 kV/m. Skillnaden ligger inom instrumentets mätosäkerhet och temperaturskillnader förekom.

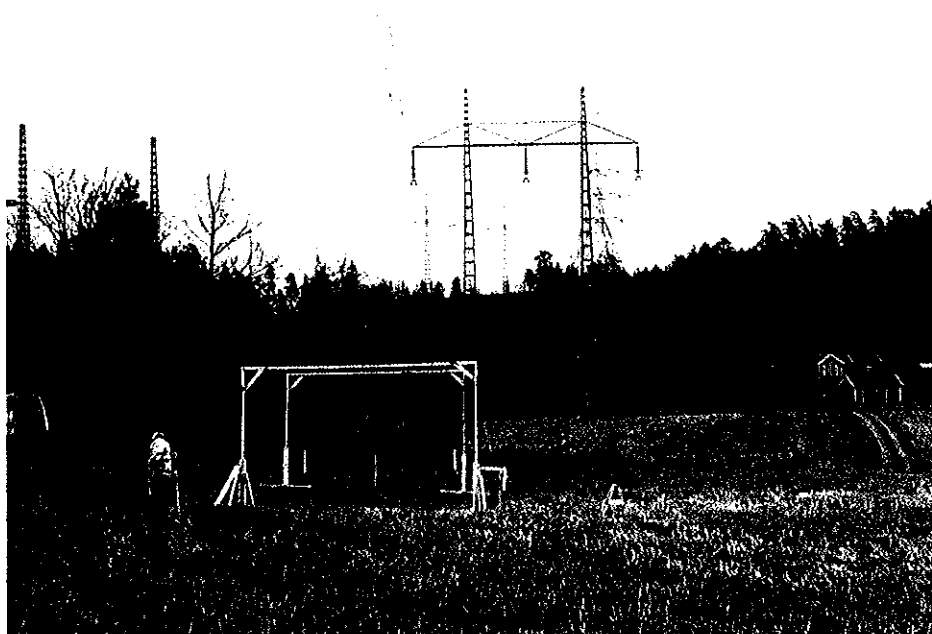


Bild 7.3: Stomme 2, 5x10x3 m, i mätområde 1

Datum: 041201	Uppmätt värde i mitten, mätpunkt 12	
Skärmlineavstånd	Elektriskt fält [kV/m]	Reducering [%]
Nedfälld stomme	2.23	0
Utan skärmlinor i stommen	2	10
3 dm	0.33	85
5 dm	0.49	78
7 dm	0.64	71
10 dm	0.73	67

Tabell 7.2: Resultat, stomme 2, 5x10x3 m.

#### 7.2.3.4 Slutsats, stomme 1, 5x5x3 m och stomme 2, 5x10x3 m

De simulerade värdena för skärmning har god överensstämmelse med de utförda skärmningarna i stomme 2.

I tabellen 7.3 nedan ses att vid ett skärmlineavstånd på tre decimeter skärmas det elektriska fältet lika mycket oberoende av stomme, men ju glesare skärmlinorna är placerade desto större inverkan har stommen på resultatet. En blöt stomme är en mycket möjlig orsak till att den påverkade mätningarna, eftersom ledningsförmågan är högre fuktigt trä än i torrt. Sannolikheten är stor att stomme 1 inte skulle ha påverkat fältbilden lika mycket under torra väderförhållanden.

I tabellen 7.3 ses att den procentuella reduceringen av det elektriska fältet i stomme 2 överensstämmer bättre med de simulerade värdena, än för den stomme 1. En större stomme skulle inte med säkerhet minska skillnaderna

mellan de uppmätta och de simulerade värdena. Dessutom skulle en större stomme vara praktiskt omöjlig att använda för skärmning inne i ställverket där avstånden inte är så stora.

Skärmlinjeavstånd	Uppmätt värde, i mitten, stomme 1, 041201		Uppmätt värde, i mitten, stomme 2, 041126		Simulerat värde, mät punkt 12	
	Elektriskt fält [kV/m]	Reduce ring [%]	Elektriskt fält [kV/m]	Reduce ring [%]	Elektriskt fält [kV/m]	Reduce ring [%]
Nedfälld stomme	2.15	0	2.23	0	1.95	0
Utan skärmlinor i stommen	0.9	58	2	10*	N/A	N/A
3 dm	0.29	87	0.33	85	0.26	88
5 dm	0.36	83	0.49	78	0.37	81
7 dm	0.44	80	0.64	71	0.48	75
10 dm	0.53	75	0.73	67*	0.62	68

Tabell 7.3: Jämförelse mellan simulerade och uppmätta värden i de två stommarna

\*Dessa värden används för att beräkna förväntade värden för det elektriska fältet inne i ställverket.

### 7.3 Skärmning av elektriskt fält inne i ställverket

Under A-skenans R-fas och mellan fas R och S i inkommande fack 3, se karta i bilaga B, uppmättes det elektriska fältet till 13.6 kV/m. A-skenan är placerad 6,9 m över marken och det minsta nettoavståndet mellan fas och jord i ställverket är 3 m, enligt mått angivna på karta över ställverket. Enligt Sveriges El-leverantörer (1999, s. 40-41) är det minsta avståndet i luft till yttre delen av riskområdet 2.5 m. Riskområde är det område kring de spänningssatta delarna där isolationsnivån inte är säkerställd vid intrång i området utan skyddsåtgärder. En placering av den 3 m höga stommen i detta område är därför möjligt för skärmning av elektriska fält.

Stommen som användes var den senare modellen där de två gavlarna kunde fällas. På så sätt underlättas arbetet med att fästa skärmlinorna. Placeringen av stommen blev sådan att dess mittpunkt var en meter förskjuten från A-skenans R-fas då porslinsisolatorer stod för nära de mått som var tänkta från början. Mätpunkten var dock fortfarande rakt under A-skenans R-fas. Till skillnad från skärmningarna gjorda i mätområde 1, där skärmlinorna var placerade längs med kraftledningen, är skärmlinorna här placerade vinkelrätt mot ledaren på grund av utrymmesskäl. Vid detta mätillfälle



användes skärmlineavståndet 10 dm. Geometrin och därmed fältbilden, är för komplicerad för en tillförlitlig simulering, därför är inga simuleringar gjorda. Istället är ett förväntat värde på det elektriska fältet i ställverket framtaget genom att se i procent hur ett skärmlineavstånd på 10 dm reducerade det elektriska fältet i mätområde 1.

Bild 7.5: Stommen nedfälld. Placerad rakt under A-skenans R-fas och mellan S-och R-fasen på inkommande kraftledning 3.

### 7.3.1 Resultat skärmning inne i ställverket

Den 6:e december 2004 provades skärmningen inne i ställverket. Resultaten presenteras i tabellen nedan. Mätvärdet under A-skenans R-fas och inkraftledning 3 mellan dess R- och S-fas, när stommen var nedfälld var 13.4 kV/m vilket i jämförelse med samma mätvärde den 26:e oktober 2004 uppgick till 13.6 kV/m, 17.5 kV/m utan plåt. Skillnaden ligger inom instrumentets mätosäkerhet. De antagna värdena redovisas i tabell 7.4. De värden som markeras med \* är tagna från tabell 7.3.

Det elektriska fältet inne i ställverket infaller mer från sidorna på stommen än vid mätområde 1, så rimligtvis blir det uppmätta värdet högre än de värden som framtagits från mätningar i mätområde 1



Bild 7.4: Stommen uppfälld med skärmlinor, inne i ställverket

Datum: 041206	Uppmätt värde		Minsta antagna värde*	
	Elektriskt fält [kV/m]	Reducering [%]	Elektriskt fält [kV/m]	Reducering [%]
Nedfälld stomme	13.4	0	13.6	0
Utan skärmlinor i stommen	13.08	2	12.2	10*
10 dm	5.1	62	4.4	67*

Tabell 7.4: Resultat, skärmning inne i ställverket, stomme 2.

\* Dessa värden är tagna ur tabell 7.3, reduktion, mätområde 1 för stomme 2.

### 7.3.2 Slutsats skärmning inne i ställverket

Det elektriska fältet inne i ställverket reducerades till 5.1 kV/m. Skärmningen reducerade alltså fältet till ett värde under insatsvärdena i EU-direktivet (2004).

I tabellen 7.4 ses att skärmningen inte är lika effektiv som de försök gjorda i mätområde 1. Detta kommer i första hand på att fältbilden inne i ställverket är mer komplex då fältet infaller från olika vinklar, men kan också komma an på att skärmlinorna inte var placerade längs med A-skenans R-fas. Eftersom den minsta antagna reduktionen vid skärmning med 10 dm mellan skärmlinorna var 67 % och uppmätta reduktionen var 6 % sämre, är resultaten rimliga.

### 7.4 Skärmlinor som nät

I simuleringarna gav en placering av parallella skärmlinor bra skärmning, men ett nät av ledare skulle kanske vara bättre för att skärma fält som infaller från olika vinklar. En skärmning med samma antal skärmlinor placerade som ett rutnät skulle kunna ge så god skärmning att färre antal skärmlinor behövdes för att uppnå samma resultat.

Både i simuleringarna och i mätningarna visades att ett avstånd mellan skärmlinorna på en meter gav tillräckligt god skärmning. Att placera samma antal skärmlinor som ett rutnät skulle innebära att skärmlinorna placeras med två meters mellanrum längs en tänkt linje i X-led och med två meters mellanrum i ett tänkt Y-led. Vid en skärmning med skärmlinor satta som nät skulle fler fästpunkter behövas än om bara parallella skärmlinor användes. Istället för stommen som användes i dessa försök där gavlarna kunde fällas och där inga sidoreglar fanns, skulle en stomme med regler och fästordningar på alla fyra sidorna behövas. Områden som ska skämmas inne i ställverket är på grund av brytare, isolatorer och dylikt inte så stora. En stomme som är stor nog att inte påverka fältbilden skulle inte få plats i det aktuella mätområdet.

En mätning med skärmlinor som nät skulle utrymmesmässigt sett varit möjlig att testa i mätområde 1. Då stomme 1 påverkade det elektriska fältet för mycket skulle två stommar av samma modell som stomme 2 användas. Att utföra detta skulle vara komplicerat då redan stomme 2 ensam var svår att spänna upp av två personer. På grund av detta har mätningar med skärmlinor satta som rutnät med stommar av modell 2 inte gjorts. Det hade däremot varit praktiskt genomförbart att använda rutnät i stomme 1. Resultatet hade dock varit svårt att tolka då stommen påverkar fältbilden mycket. Det hade varit svårt att uppskatta hur mycket den påverkade mätningarna vid rutnät och frågan är om resultaten varit jämförbara med de uppmätta värdena för parallella linor.

### 7.5 Människa i under skärmningen

En naturlig följdfråga är huruvida en människa påverkar det elektriska fältet under skärmningen. Den största fältförstärkningen kring en människokropp uppstår runt huvudet. Den kraftigaste fältförstärkningen uppträder när en person befinner sig i fältet, mitt emellan två skärmlinor. Simuleringar där en perfekt ledande smal rektangulär kropp med bredden 1 dm och höjden 2 m placerad 11 m från mittfasen gjordes dels utan skärmning och dels med skärmning. Skärmningen hade ett skärmlinavstånd på 10 dm och kroppen

befann sig i mitten av skärmningen, mellan två skärmlinor. Fältet på toppen av rektangeln minskade med 65 % vid jämförelse mellan oskärmat fält och fält vid 10 dm skärmning,. Utan den rektangulära kroppen var skärmningen som tidigare nämnts 67 %. Skärmningen blev alltså cirka 2 procentenheter mindre när en kropp befann sig under skärmningarna. En försämring på 2 procentenheter gör ingen större skillnad då det uppmätta värdet minskades till ett så lågt värde som 5.1 kV/m.

## 8 Alternativa metoder för uppfyllande av direktivet

Fokus i den här rapporten har legat på skärmning av elektriska fält, men det finns andra alternativa sätt att uppfylla direktivet från EU.

### 8.1 Skyddskläder

Kläder som skyddar mot elektriska fält är etta alternativ för att uppfylla direktivet. I Stenkullen idag används inga skyddskläder mot elektromagnetiska fält, utan bara kläder som är flamskyddande, hjälm och skor med gummisula. Halvledande gummistövlar har funnits liksom kläder som skyddar mot elektromagnetiska fält, men dessa används inte längre.

Vid förfrågan svarar Kent Nilde<sup>1</sup> att inga bestämmelser eller rekommendationer finns gällande skyddskläder för elektromagnetiska fält, varken externt eller internt på Vattenfall. Däremot finns skyddskläder utvecklade med tanke på faran för ljusbågar.

J-B Mårtensson<sup>2</sup> skriver att elektriska fält i ställverk inte diskuteras i någon större utsträckning bland arbetsgrupperna i ställverken. Fokus har legat på de magnetiska fälten när undersökningar har gjorts angående arbetsplatser för några år sedan. Inom Vattenfall är det arbetsgrupperna inom underhåll av ställverksapparater som exponeras för elektromagnetiska fält mer än andra. Brytarmontörer tillbringar, enligt Mårtenssons erfarenhet, uppskattningsvis 60-70 % av arbetstiden i ställverk. Denna tid avser ställverk som innefattar hela spänningsintervallet från 0.4 till 400 kV. Det arbete som bedrivs i 130 kV och 400 kV-ställverk, utförs till viss del i skylift och är svår att uppskatta, men det rör sig kring 25 – 40 % av arbetet i ställverk. De arbetsgrupper som arbetar med frånskiljare utsätts för betydligt mindre exponeringstid då det, till skillnad mot brytarmontörer, inte är deras huvudsakliga arbetsuppgift. Ytterligare arbeten i ställverk, såsom kontrollrundor, rör sig om några få timmar per vecka.

### 8.2 "Säkrade" områden och nybyggnationer

I artikel 5.2a i direktivet står det till exempel om "alternativa arbetsmetoder, så att exponeringen för elektromagnetiska fält minskar". Detta skulle kunna leda till att i redan befintliga ställverk kan områden med för höga elektriska fält spärras av. Säkrade vägar där det elektriska fältet klarar gränsvärdena kan sedan användas vid ronder. Det står i artikel 5.2e i direktivet om "utformningen och planeringen av arbetsplatser och arbetsställen" och en högre placering av ledarna vid ny- och ombyggnationer av ställverk skulle leda till att det elektriska fältet på marken minskar. (Europaparlamentet, 2004).

<sup>1</sup>Kent Nilde, Vattenfall, mailkontakt den 19 november 2004

<sup>2</sup>Jan-Börje Mårtensson, Vattenfall Service Syd AB, mailkontakt den 22 oktober 2004

## 9 Diskussion

En reduktion av det elektriska fältet i 400 kV-ställverket i Stenkullen till en nivå under det i EU-direktivet (2004) satta insatsvärdet 10 kV/m kan göras genom skärmning med jordade skärmlinor. Det har även visats i denna rapport att det behövs endast ett fåtal för att erhålla en effektiv skärmning. För att skärma fältet med 62 % krävs ett skärmlinjeavstånd på 10 dm och en vajertjocklek på 5 mm. Efter gjorda mätningar och simuleringar kan även slutsatsen dras att trots svårigheten att mäta elektrisk fältstyrka finns tillfredställande metod att göra detta.

När mätinstrumentet placeras på plan mark sker en fältförstärkning vid mätpunkten då instrumentet är ca 12 cm högt. Genom att placera en jordad plåt, med arean 1 m<sup>2</sup>, ovanpå instrumentet utjämnas fältförstärkningen och överskattningen av fältet minskas. Vid mätningar i mätområde 1 minskades mätresultaten i snitt med 17 % när den jordade plåten användes. De uppmätta och simulerade fältbilderna över området var tillfredställande lika när plåten användes.

De simulerade och uppmätta värdena skiljer sig åt i resultaten både för mätområde 1 och mätområde 2. De uppmätta värdena är högre än de simulerade värdena i mätområde 1, till skillnad från resultaten i mätområde 2. Denna skillnad kan förklaras av den aktuella höjden på ledningen mättes vid samma tidpunkt som mätningen i mätområde 2 utfördes. De simulerade värdena för mätområde 1 gäller för en höjd uppmätt till 17.74 m, vid lufttemperatur 7°C, men eftersom lufttemperaturen mättes tidigt på förmiddagen och steg under dagen och att lasten inte var konstant, är det troligt att ledningens nedhäng och således även det elektriska fältet var ett annat vid mättillfällets slut på eftermiddagen.

Vid mätningar utförda i mätområde 1, varierade mätresultaten mer utan plåten än med plåt pålagd. Vid mätningar utförda med plåt i mätområde 2 den 24:e november 2004 gav mätinstrumentet, efter en timmes mätning i -8 °C och drygt en dm snö, orimliga värden. Mätinstrumentet skyddades från fukt med plast, men kablar låg fria, vilket kan ha påverkat resultaten. Även jordningen kan ha påverkat eftersom det var tjäle i marken

Det elektriska fältet påverkas inte direkt av strömmen på ledningen, men däremot beror nedhänget på ledningarna av strömmen eftersom ledningarna värms vid hög ström. För att förbättra simuleringarna kunde värmningen av ledningarna på grund av ström även tas med, alternativt kan ledningshöjden mätas vid varje mättillfälle.

Det valda skärmlinjeavståndet, 10 dm, reducerar det elektriska fältet i ställverket med 62 %. I EU-direktivet står "Med beaktande av de tekniska framsteg och tillgängliga åtgärder för att påverka en risk vid källan, skall de risker som härrör från exponering för elektromagnetiska fält elimineras eller nedbringas till lägsta möjliga nivå". Beroende på hur direktivet tolkas kan olika skärmlinjeavstånd användas. I denna rapport valdes den skärmning som varken var högsta möjliga reduktion eller lägsta tillåtna reduktion. Enligt simuleringar reduceras det elektriska fältet tillräckligt väl med ett skärmlinjeavstånd på 10 dm, både under mitten och under kanterna av skärmningen, för att med marginal klara gränsvärdena. Stommen med

nedfällbara gavlar användes vid skärmning inne i ställverket.

De två olika stommarna där skärmlinorna fästes var båda gjorda av trä och blöta. Fyra olika skärmningar testades i stommarna, med skärmlinjeavstånden 3, 5, 7 och 10 dm och med en vajerdimension på 5 mm i diameter. Stommen som var 5x5x3 m reducerade det elektriska fältet med nästan 60 %, trots att konstruktionen bestod av några få reglar. Vid kort skärmlinjeavstånd påverkade inte stommen mätresultaten, utan de stämde överens med de simulerade värdena. Den andra stommen, 5x10x3 m, hade fällbara gavlar och inga sidoreglar. Endast stommen reducerade fältet med ungefär 10 %. Den procentuella reduktionen av det elektriska fältet var något högre i simuleringarna, men stämde överlag med mätresultaten. Av detta drögs slutsatsen att mätresultaten är tillförlitliga nog att användas som underlag för skärmning inne i ställverket, där inga simuleringar har gjorts.

En intressant iakttagelse är den skärmning av det elektriska fältet som endast stommarna utgjorde. Vid mätningarna var stommarnas skärmningsförmåga en negativ effekt, speciellt för stomme 1. För uppfyllande av EU-direktivet är däremot stommarnas skärmning av det elektriska fältet något positivt eftersom fältet reducerades.

Mätresultatet förväntades vara något högre än det beräknade, då fältet infaller från olika vinklar. Reducering av det elektriska fältet inne i ställverket uppgick till 62 %, vilket är 6 % sämre än försöket i mätområde 1, alltså som förutspått. Det skärmade ostörda fältet i ställverket var 5.1 kV/m. Med simulerad kropp under skärmlinorna, blev reduktionen 2 % mindre, vilket motsvarar ett ostört fält på 5.4 kV/m. Ett skärmlinjeavstånd på 10 dm reducerade det elektriska fältet inne i ställverket, från 13,4 kV/m till 5.1 kV/m, det vill säga 62 %. Med denna skärmning uppfylls kraven på lägre fältstyrka än gränsvärdet på 10 kV/m.

Skulle en mätning av fältet göras med samma mätinstrument, men utan den jordade plåten, skulle värdet 17.5 kV/m reduceras med 61.9 % till 6.7 kV/m, vilket är lägre än gränsvärdet 10 kV/m.

Vid jämförelse mellan de olika vajerdimensionerna och de olika skärmlinjeavstånden, konstateras att avstånden mellan skärmlinorna är av större betydelse än dess diameter. Detta resultat stämmer överens med H. M. Ismails rapport (1999, s. 198).

Simuleringarna av mätområde 1 och 2 är gjorda i 2D, då de i detta fall ger ett lika tillförlitligt resultat som simuleringar i 3D. En simulering i 3D hade varit nödvändig om skärmlinor placerade som nät hade undersökts. Praktiska försök med skärmlinor placerade som nät var inte genomförbara inne i ställverket.

Gränsvärdena satta i direktivet grundar sig på den inducerade strömmen i kroppen. Simuleringar och beräkningar av ström i bälgen vid olika skärmningar av det elektriska fältet som sedan jämförs med mätningar av strömmen i anklarna, är av intresse.

Denna rapport har visat att det elektriska fältet i 400 kV-ställverket i Stenkullen med enkla medel kan nedbringas till en nivå under det

insatsvärde som presenteras i EU-direktivet (2004). När dessutom mätningarna och simuleringarna stämmer väl överens kan de i denna rapport formulerade målen anses uppfyllda.

## Referenser

- Abd-Allah M. A. (1999). *"Effects of electrical soil properties on electric fields around EHV transmission lines"*. Transmission and Distribution Conference, 1999 IEEE , Volume: 2; 11-16 April 1999; New Orleans, LA USA; s.730 - 733 vol.2
- Cheng D. K. (1994). *"Fundamentals of engineering electromagnetics"*. USA: Addison-Wesley Publishing Company inc.
- Dubek, B (1990). *"Protection Measures Against the Effect of the 50 Hz Electric Fields"*. Energetyka. vol 44, n 6, juni 1990; s. 211-13
- EnviroMentor (1998). *"Bruksanvisning Electric Field Meter EMM-4"*. Göteborg: EnviroMentor AB
- Europaparlamentet , 2004, *"Europaparlamentets och rådets direktiv 2004/40/EG av den 29 april 2004, Om minimikrav för arbetstagares hälsa och säkerhet vid exponering för risker som har samband med fysikaliska agens (elektromagnetiska fält) i arbetet (18:e särdirektivet enligt artikel 16.1 i direktiv 89/391/EEG)"*, Europeiska unionens officiella tidning
- ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) (1998). *"Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)"*. Health Physics Society, vol. 74:4
- Ismail, H. M. (1999). *"Shielding Design Methods for Kuwait High Voltage Double Circuits Electrical Networks"*, Proceedings of 1999 PowerTech Conference; 29 aug.-2 sept. 1999; Budapest, Ungern; s. 198
- Lövstrand K. G. & Bergström, S. (1980). *"Exposition för elektriska fält – En kartläggning av den elektrofysikaliska arbetsmiljön i ställverk"*. Stockholm: Arbetarskyddsverket.
- Poljak, D (2004). *"Human Exposure to Electromagnetic Fields"*. Southampton: WIT press.
- Sveriges Elleverantörer (1999). *"ESA -99"*. Stockholm.
- Udod, Taloverya & Nijnik (1995). *"Shielding of Workers from Electric and Magnetic Fields During Live Line Work in Ukraine"*. Operation and Live-Line Maintenance. Proceedings of ESMO'95 - 1995 IEEE 7th International Conference on Transmission and Distribution Construction; 29 okt.-3 nov 1995; Columbus, OH, USA; s. 163-70.
- Ventakeswarlu & Narayana Rao (1995). *"Shielding Efficiency Measurements Under Pulsed Electromagnetic Fields"*. International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility; 6-8 dec. 1995; Madras; s. 184-89.

Åke, J & Fracke, J (2004). *"Magnetiska och elektriska fält i ställverksmiljö: kartläggning av en äldre anläggning"*. Göteborg: Elektromagnetik Chalmers Tekniska Högskola.

## BILAGA A

Mätområde 1: Mätning med och utan plåt, utan skärmning.

Mätning under 400 kV-ledning, mitt i spannet mellan stolpe 652 och 653

Mätt från mittfasen, med en meters mellanrum. Mät punkt ett är placerad vid noll meter från mittfas. Spegling för att få hela fältbilden.

Datum: 041028			Datum: 041011		
Väder: Klart & soligt. Kyligt, +7°C, sedan varmt			Väder: Klart & soligt. Kyligt, +7°C, sedan varmt		
Tid	Mät-punkt	Mätinstrument med plåt, [kV]	Mätinstrument utan plåt, [kV]	Mätinstrument med plåt, [kV]	Tid
11.45	1	1.09	1.37	1.17	12.4
	2	1.13	1.33	1.14	12.42
	3	1.22	1.52	1.25	12.44
	4	1.25	1.56	1.27	12.45
	5	1.33	1.85	1.44	12.46
	6	1.42	1.88	1.48	12.48
	7	1.56	2.11	1.67	12.49
	8	1.61	2.2	1.76	12.51
	9	1.89	2.34	1.9	12.52
11.57	10	1.9	2.39	1.98	12.53
	11	2.13	2.26	1.97	12.55
	12	2.15	2.93	2.27	12.56
	13	2.18	2.69	2.2	12.58
	14	2.14	2.59	2.16	12.59
	15	2.3	2.37	2.12	13
	16	2.15	2.54	2.06	13.03
	17	1.89	2.46	2.01	13.05
	18	1.85	2.22	1.91	13.07
	19	1.59	1.91	1.71	13.09
	20	1.42	1.61	1.4	13.11
	21	0.96	1.25	0.95	13.13

Mätområde 2: Mätning med och utan plåt, utan skärmning  
Mätning under 400 kV-ledning, mitt i spannet mellan stolpe 652 och 651  
Mätt från mittfasen, med en meters mellanrum. Mätpunkt ett är placerad vid  
noll meter från mittfas. Spegling för att få hela fältbilden. Mätningarna  
påbörjades kl 13:40

Datum: 041124		Väder: Klart & soligt. Kallt, -8°C
Avstånd från mittfas	Mätpunkt	Mätinstrument med plåt, [kV]
0	1	0.39
1	2	0.42
2	3	0.47
3	4	0.52
4	5	0.61
5	6	0.69
6	7	0.78
7	8	0.84
8	9	0.96
9	10	1.03
10	11	1.15
11	12	1.17
12	13	1.18
13	14	~1.28
14	15	~1.33
15	16	~1.29
16	17	~1.27
17	18	~1.29
18	19	~1.32
20	20	~1.28
21	21	~1.29
35	22	~0.42

