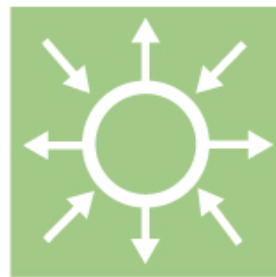


Arbete i höga elektriska och magnetiska fält

Luftledningar 70 – 400 kV

Elforsk rapport 09.99



Anette Larsson och Göran Olsson

Oktober 2009

ELFORSK

Arbete i höga elektriska och magnetiska fält

Luftledningar 70 – 400 kV

Elforsk rapport 09.99

Förord

Elforsk har sedan 1990-talet bedrivit verksamhet inom området kraftfrekventa elektriska och magnetiska fält (EMF). Programmet under år 2008-2009 har omfattat bl.a. forskning kring arbetsmiljöförhållanden med avseende på elektriska och magnetiska fält vid arbete under spänning i kraftledningsmiljö mm.

Arbetet i denna rapport har initierats av programmets styrgrupp och granskats av Svensk Energis EMF-grupp bestående av:

Mats Wahlberg (ordf), Skellefteå Energi
Sven-Olof Lång (sekr), Svensk Energi
Lennart Engström, Vattenfall Eldistribution
Jan Berglund, Vattenfall
Bengt Hanell, Elforsk
Eskil Agneholm, Fortum Distribution
Ulf Thorén, E.ON Elnät Sverige

De företag som bidragit till finansieringen av detta projekt är: Energiverken i Halmstad AB, E.ON Elnät Sverige AB, Fortum Distribution AB, Gävle Energi AB, Göteborg Energi AB, Jämtkraft AB, Luleå Energi Elnät AB, Lunds Energi AB, Mälarenergi Elnät AB, Nacka Energi AB, Skellefteå Kraft AB, Sundsvall Energi Elnät AB, Svenska Kraftnät och Växjö Energi Elnät AB.

Stockholm oktober 2009
Bengt Hanell
Elforsk AB
Programområde Överföring och distribution

Sammanfattning

Att vistas i närheten av luftledningar medför oundvikligen att man exponeras för elektriska och magnetiska fält. Storleken av dessa fält beror av ledningens typ, dess spänningsnivå och belastning och naturligtvis av avståndet till faslinorna. I detta projekt ägnas det största intresset den grupp personer som utför olika former av underhåll på själva ledningen. Avstånden till faslinorna blir i dessa fall korta och fälten förhållandevis höga. Vid Arbete Med Spänning och med den s k barhandsmetoden, kommer montören t o m i direktkontakt med spänningsförande anläggningsdel. Exponeringen blir då särskilt hög.

Fält och exponering har i detta arbete relaterats till de kända begreppen riskområde och närområde.

Elektriska och magnetiska fält har beräknats för nio ledningar med raklinjestolpar för 70, 130, 220 och 400 kV. Fälten har beräknats dels vid stolpen och dels i den punkt ute i spannet där ledningen hänger på minimihöjd. Samtliga fall har beräknats 2-dimensionellt analytiskt och ett 130 och ett 400 kV fall har beräknats 3-dimensionellt med FEM-programvara (COMSOL Multiphysics).

Miljön runt luftledningarna kan delas in i tre zoner med olika förutsättningar för hur fälten kan beräknas:

- Fält vid markytan och någon meter däröver
- Fält i fasledarnas närhet
- Fält invid stolpben, regler och andra detaljer

Fält tillhörande den tredje gruppen kräver 3-dimensionella beräkningar, medan de två första kan beräknas 2-dimensionellt analytiskt.

Verifierande mätningar har utförts för att framförallt kontrollera inverkan av stolpen och jordade detaljer på de elektriska och magnetiska fälten.

Bedömningen av de olika exponeringsfallen har baserats på aktuella regelverk för exponering. I dagsläget finns ICNIRP Guidelines från 1998 och EU:s EMF-direktiv 2004/40/EG från 2004. Nya riktlinjer från ICNIRP väntas under senare delen av 2009 och de kan förändra grunderna för denna bedömning.

Det visas att förhållandevis höga magnetiska fält är ett betydligt mer lokalt fenomen än motsvarande höga elektriska fält. De förra överskrider aktuella insatsvärden ($500 \mu\text{T}$) endast på mycket kort avstånd från fasledarna. Det elektriska fältet, däremot, överskrider 10 och även 20 kV/m på relativt stort avstånd. Generellt fås de högsta fältstyrkorna i området mellan faslinorna. Förhållandevis höga E-fält (20 – 35 kV/m) kan även förekomma längs jordade stolpben. Dessa fältnivåer innebär att de s k insatsvärdena för exponering kan komma att överskridas vid "vanligt" underhållsarbete. Exponering nära gränsvärdet kan däremot endast bli aktuellt vid Arbete Med Spänning. Risken för obehagliga gnisturladdningar vid klättring i stolpben mm, måste dock alltid beaktas.

Effekten av höga elektriska fält kan begränsas genom att använda en ledande dräkt och sådana rekommenderas framförallt för arbete med barhandsmetoden. Magnetiska fält begränsas lättast genom att iaktta ett visst minsta avstånd till strömförande ledning. Generellt gäller att arbete i höga fält kräver en omsorgsfull planering och ett disciplinerat arbete.

Summary

Overhead lines are always associated with the exposure for electric and magnetic fields. The exposure levels depends on the conductor configuration, voltage level, current and the distance to the line. This project has focused on the exposure of maintenance team working very close to the lines. The most exposed group are the live line workers and especially these working with the so called Bare hand method (i. e. in contact with the live conductors).

The actual field levels and the exposure of workers have been related to the distances Live working zone and Vicinity zone, defined in standards.

Electric and magnetic fields have been calculated for nine different line configurations and for 70 - 400 kV. The fields have been calculated both at the tower and at minimum height above ground. Field levels in all sections have been calculated with a 2D analytical method and one 130 kV and one 400 kV section have also been calculated with a FEM-program (COMSOL Multi-physics), suitable for 3D calculations with grounded structures.

The environment close to the lines can be divided into three zones, with different conditions for the field calculations.

- Field at ground level and a few meters above.
- Field in the vicinity of the phase conductors.
- Field close to tower legs, cross-arms and other grounded objects.

Calculations for the third group can only be performed with 3-dimensional numerical methods, but the two first ones can also be analyzed analytically.

Verifying measurements of both the electric and magnetic fields have been carried out to check the influence of different steel constructions.

The assessment of the different exposure scenarios have been based on the existing documents from ICNIRP and EU, i. e. ICNIRP Guidelines from 1998 and the EMF Directive 2004/40/EC issued by the European Union in 2004. New Guidelines from ICNIRP can be expected during the later part of this year 2009 and they may give a new base for the assessment.

It can be concluded that high magnetic fields are more local than high electric fields. Magnetic field levels above the Reference level of 500 μ T exists only very close to the conductors. The electrical field, however, may exceed the Reference level of 10 kV/m even at a rather long distance from the conductors. Highest E-field levels can be found in the area between the phase conductors. High levels (20-35 kV/m) can also be found along the upper part of the grounded tower legs. As a consequence of this, the Reference levels may be exceeded even at ordinary maintenance work, but exposure more close to the Basic restrictions should be limited to Live working only. However, the risk for unpleasant spark discharges during work in high voltage environment must not be neglected.

The consequences of high electric fields can be limited by using a special conductive suit and such protective suits are recommended for live line working with the bare hand method. Magnetic fields are most easily reduced by increasing the distance to the current carrying conductors. In general, all work in high field environment require careful planning and discipline.

Innehåll

1	Inledning	1
2	Litteraturöversikt	2
3	Gränsvärden och riktvärden för exponering	7
4	Arbete och avstånd	11
4.1	Arbete	11
4.2	Riskområde och närområde	11
4.3	Icke elektriskt arbete, Arbete Nära Spänning och Särskilda arbeten	13
4.4	Arbete Med Spänning	14
4.5	Arbetsområde och avstånd vid olika typer av arbete	14
5	Luftledningar	20
5.1	70 kV, fasavstånd 4,0 m (70_4)	20
5.2	70 kV, fasavstånd 3,0 m (70_3)	21
5.3	130 kV, fasavstånd 5,0 m (130_5)	21
5.4	130 kV, fasavstånd 4,0 m (130_4)	21
5.5	220 kV, Simplex (220_7,2_S)	22
5.6	220 kV, Duplex (220_7,2_D)	23
5.7	400 kV, fasavstånd 12 m, Duplex (420_12,0)	23
5.8	400 kV, fasavstånd 11 m, Triplex (420_11,0)	24
5.9	400 kV, fasavstånd 9 m, Triplex (420_9,0)	24
6	Beräkningar	25
6.1	Analytiska beräkningar	25
6.1.1	Elektrisk fältstyrka	25
6.1.2	Magnetisk flödestäthet	25
6.2	Numeriska beräkningar	26
6.2.1	Elektrisk fältstyrka	28
6.2.2	Magnetisk flödestäthet	31
7	Resultat och diskussion	35
7.1	Elektrisk fältstyrka	35
7.1.1	Analytisk beräkning av fältstyrkan på markytan	37
7.1.2	Analytisk beräkning av fältstyrkan i fasledarnas närhet	40
7.1.3	Numerisk beräkning av fältstyrkan nära stolpen och regler	46
7.2	Magnetisk flödestäthet	50
7.2.1	Magnetisk flödestäthet på markytan	51
7.2.2	Magnetisk flödestäthet i fasledarnas närhet	54
7.2.3	Magnetisk flödestäthet nära stolpen och regler	58
8	Verifierande mätningar	63
8.1	Instrument	63
8.2	Mätningar och resultat	65
8.2.1	Mätning 130 kV	65
8.2.2	Mätning 400 kV	67
8.3	Diskussion mätningar	70
9	Slutsatser och rekommendationer för arbete i höga fält	71
10	Referenser	77

1 Inledning

Att vistas i närheten av luftledningarna medför oundvikligen att man exponeras för elektriska och magnetiska fält. Storleken av dessa fält beror av ledningens typ, dess spänningsnivå och belastning och naturligtvis av avståndet till faslinorna. I detta projekt begränsas de exponerade till de som exponeras i arbetslivet. Det är ändå en stor grupp, alltifrån de som utför underhållsarbete på ledning och ledningsgata, till de som bara "råkar" ha sin arbetsplats nära ledningen, som bl a skogs- och jordbruksarbetare.

En stor del av studien ägnas åt den mindre gruppen personer som utför olika former av underhåll på själva luftledningen, både utan och med spänning. Avstånden till faslinorna blir i dessa fall korta och fälten förhållandevis höga. Vid Arbete Med Spänning och med den sk barhandsmetoden, kommer montören t o m i direktkontakt med spänningsförande anläggningsdel. Exponeringen blir hög och det finns därför all anledning att ägna dessa fall en särskild omsorg.

Denna undersökning har inkluderat en litteraturstudie med syfte att inventera vad som tidigare gjorts inom områdena fält i ledningsmiljö och akut hälsopåverkan av arbete nära luftledningar.

Tänkbara underhållsåtgärder för luftledningar 70–400 kV har analyserats och troliga arbetspositioner har identifierats. Det skall redan här betonas att detta har inkluderat arbetsuppgifter och arbetssätt som ännu inte förekommer i Sverige.

Elektriska (E-) och magnetiska (B-) fält har beräknats med både analytiska och numeriska metoder. Båda beräkningssätten har sina för- och nackdelar. De analytiska metoderna bygger på en enkel modell och datainmatning och beräkningar går därför fort. De numeriska metoderna kan inkludera i stort sett allt, men då tar det tid. I detta projekt har de analytiska metoderna använts för att studera fältet på avstånd från jordade strukturer som stolpen, reglar etc. De har likaså använts för att studera inverkan av parametrar som fasavstånd, ledarkonfiguration etc.

En företeelse värd att studera är den lokala ökningen av den elektriska fältstyrkan som uppstår nära ledande föremål, som stolpen, staglinor, reglar etc. Även den magnetiska flödestätheten påverkas lokalt av stålkonstruktioner. Lokala fältförhöjningar av detta slag kan vara av stort intresse, då de uppträder på platser där montörer kan vistas. För dessa detaljstudier har de numeriska beräkningarna kompletterats med mätningar.

Rapporten avslutas med rekommendationer för arbete i och nära luftledningar. Möjligheter att begränsa exponeringen diskuteras.

Beräknade exponeringssituationer har bedömts enligt de riktlinjer som ges i ICNIRP Guidelines från 1998 [1] och enligt EU's EMF-direktiv från 2004 [2]. Införandetiden för EU-direktivet har förvisso flyttats fram från 2008 till 2012 och en ny och reviderad utgåva av ICNIRP Guidelines kan förväntas komma under året, men i brist på annat är det endast dessa dokument som enkelt kan ge underlag för bedömning av en exponeringssituation.

2 Litteraturöversikt

Det finns en stor mängd litteratur som beskriver elektriska och magnetiska fält under kraftledningar och särskilt då med tonvikt på fält någon meter ovan markytan och allmänhetens exponering. Däremot är det betydligt mer begränsat när det gäller arbete i ledningarnas omedelbara närhet, i miljöer med generellt högre nivåer av fält.

Av intresse är de nu drygt 20 år gamla svenska studier som avrapporterats i serien Arbete och Hälsa [3, 4]. Möjligen är intresset mer betingat av det svenska ursprunget än av själva innehållet, men artiklarna visar att det pågått en omfattande svensk verksamhet inom detta område och att den har huvudsakligen berört Vattenfall och Sydkraft. Studien omfattade 706 svenska män som arbetat inom elproduktion eller eldistribution och som anställdes under perioden januari 1981 – juni 1985. Efter 9 år fanns 406 personer kvar i gruppen.

Rapporterna ger en antydning om vad som gjorts och vilket ursprungsmaterial som möjligen kan finnas kvar. För ledningar är det framförallt isolatorkontroll som har studerats. Den högsta fältstyrkan, ca 20 kV/m, uppmättes när linjearbetaren var i jämnhöjd med den spänningssatta fasen på ledning för 400 kV. Det publicerade och idag tillgängliga materialet är väl bearbetat och det är därför svårt att hitta mer detaljerade uppgifter om hur arbetet verkligen har utförts.

Inom ramen för den nämnda studien genomförde man 1986 en undersökning på 20 linjearbetare från Vattenfall och 6 st från Sydkraft. Gruppen fick genomföra isolatorkontroll på en vanlig spänningssatt 400 kV ledning och på en motsvarande spänningslös ledning. Före och efter arbetet kontrollerades EEG, man tog blodprov och man genomförde även psykometriska test. Under arbetet på den spänningssatta ledningen mättes de elektriska och magnetiska fälten. Det ostörda E-fältet kunde i arbetspositionen uppgå till ca 9 kV/m, med ett medelvärde under arbetsdagen på 2,1 – 3,6 kV/m. Det maximala B-fältet uppgick till ca 55 μ T, med variationer under arbetsdagen mellan 14,7 och 24,8 μ T. Studien avslutades med konstaterandet att det inte går att påvisa någon negativ, akut effekt på nervsystemet vid exponering för elektriska och magnetiska fält. Man kunde däremot finna en viss överrisk för diverse neurastena besvär som trötthet utan särskild orsak, ångslan, oro och nervositet, vid exponering för magnetfält. I samband med exponering för elektriska fält noterades en viss riskökning för förhöjd halt av kortisol (Kortisol är ett hormon som tillverkas i binjurarna och kan utsöndras i större mängd vid stressreaktioner. Halten i blodet har bl a påverkan på immunförsvaret.)

De svenska uppgifterna om aktuella fältstyrkor stöds bl a av beräkningar från det italienska nätföretaget ENEL som visar att E-fältet vid stolpbenet på en 380 kV ledning kan uppgå till ca 30 kV/m och 100 μ T vid 1500 A [5]. Uppgifterna om magnetfält bekräftas ytterligare av Engelmann m fl [6], som har beräknat och mätt den magnetiska flödestätheten invid konfigurationer med 1 – 4 linor. 645 A i en lina uppges ge 0,7 mT på 20 cm avstånd från

linan. Med 2 x 645 A i en Duplex-konfiguration fås 1,0 mT på 20 cm avstånd från närmaste lina och med 3 x 645 A i en Triplex-konfiguration fås 1,2 mT på samma avstånd. Inverkan av övriga faser kan man enligt författarna bortse ifrån, då inverkan av dessa är < 5 % vid avstånd av denna storleksordning.

Den magnetiska flödestätheten påverkas av ferritiska material och detta diskuteras i en artikel av Kato m fl [7]. Författarna visar att fältet lokalt kan öka med i storleksordningen 50 % vid stolphörnen. Graden av ökning är emellertid beroende av fältets storlek och 50 % är en rimlig siffra vid ett B-fält av 85 μ T. Lägre fält ger mindre ökning.

Från Polen rapporteras om mätningar av fältkomponenter av högre frekvens. I en ISH-artikel från 2003 beskrivs beräkningar och mätningar av E-fält i stolpar för 110 kV [8]. Det visas att E-fältet i frekvensområdet 1-100 kHz överstiger 1000 V/m, vilket är betydligt högre än de 100 V/m som de polska föreskrifterna kräver och även högre än ICNIRPs motsvarande referensvärde på 610 V/m. För B-fältet noteras inte motsvarande problem.

I en artikel ett par år senare redovisar Nadolny [9] mätningar inuti en regel för 220 kV. Rakt ovanför mittfasen mättes < 1 kV/m (50-2000 Hz) och samma nivå mättes upp vid knutpunkten mellan regel och stolpben. Han redovisar även mätningar av E-fältet i en position mycket nära mittfasen. Med montören ståendes på en steg isolerad från spänning uppmättes < 1 kV/m och med stegen kopplad till mittfasen uppmättes < 4 kV/m. Resultatet måste emellertid betraktas som märkligt då närheten till faslinan borde ge upphov till ett betydligt högre E-fält. Det högfrekventa innehållet är också lågt så länge montören inte är kopplad till fasen. När han kopplar den ledande dräkten till fasen ökar de högfrekventa fälten (1-100 kHz) märkbart till 1500-1800 V/m. Författaren förklarar detta med urladdningar från dräkten, vilket förefaller troligt.

Det elektriska fältet kan ge upphov till gnisturladdningar och kontaktströmmar och de förra kan upplevas som besvärliga om urladdningen uppgår till ca 3 μ C, motsvarande 15 kV vid 200 pF och 2,5 kV vid 1200 pF [10]. Kapacitansen mellan en människa och jord överstiger sällan 200 pF.

En artikel från EDF och ungefär samma tid [11] visar att uppehållstiden i kritiska positioner med höga fält är kort, men man säger också att uppehållstiderna kommer sannolikt att öka framöver. Sett över helåret arbetar man i riktigt höga fält under mycket begränsad del av tiden (20 av 1600 tim), på avstånd (med isolerstång) ca 300 av 1600 tim/år.

Under den senare delen av 90-talet börjar det komma alltför många artiklar om beräkning av elektriska storheter i människokroppen, som strömtäthet och elektrisk fältstyrka. Ett yttre B-fält ger upphov till cirkulerande strömmar i människokroppen och ett yttre E-fält ger upphov till strömmar genom kroppen till jord och storleken av dessa företeelser kan uttryckas på olika sätt. De inre strömmarna påverkas kraftigt av kroppens lokala konduktivitetsvariationer i form av blodkärl, urinledare, cerebrospinalvätska etc och från flera håll hävdas därför att den inre elektriska fältstyrkan är en bättre parameter att studera än strömtätheten.

Ett flertal författare redovisar beräkningar av inre storheter (strömtäthet eller inre elektrisk fältstyrka) orsakad av yttre fält. I många fall är kroppsmodellerna enkla och framförallt homogena och kan inte användas för annat

än för mer principiella studier. Dimbylow i Storbritannien och Dawson & Stuchly m fl i Kanada har dock publicerat ett flertal intressanta artiklar om mer detaljerade beräkningsmodeller [12-22]. De två teamen har också gjort jämförande studier av sina modeller och kunnat konstatera att de stämmer rimligt väl överens [20].

Dessvärre är inte modellen det enda problemet. Efterbehandlingen av data är också problematisk och i synnerhet hur den i riktlinjerna efterfrågade strömtätheten skall kunna medelvärdesbildas över 1 cm^2 vinkelrät strömriktningen. Frågan har tagits upp av bl a Dimbylow 2008 [22], som inriktat sig på problemet med medelvärdesbildning i organ med litet tvärsnitt, som ryggmärgskanalen och näthinnan (retina).

Redovisade beräkningar av Dawson m fl på realistiska arbetspositioner invid luftledningar [19] visar att kravet på en högsta strömtäthet på 10 mA/m^2 är uppfyllt för flertalet arbetspositioner invid fasar med 1000 A per enskild ledare. I dessa fall bortses helt från inverkan av det elektriska fältet. En beräkning visar att den 99:de percentilen av strömtäthetens medelvärden i hjärnan uppgår till $4,9 \text{ mA/m}^2$ om medelvärdet beräknas på ett sätt (F-metoden) och till $1,0 \text{ mA/m}^2$ om det beräknas på ett annat sätt (T-metoden). F-metoden tar hänsyn till alla beräkningspunkter inom 1 cm^2 , även om de ligger inom ett annat organ, medan T-metoden negligerar värden i andra organ. Med F-metoden kan man i hjärnan på detta sätt få med beräkningspunkter i områden med cerebros spinalvätska med hög konduktivitet och hög strömtäthet. Med T-metoden får man bara hjärnvävnad med lägre konduktivitet och lägre strömtäthet. Därtill negligeras eventuella punkter i annan vävnad och medelvärdet minskar ytterligare.

Beräkningar av detta slag blir dock med nödvändighet mycket komplicerade och kan knappast bli aktuella annat än för mer grundläggande studier. För "vardagsbruk" måste man ha ett enklare arbetssätt. I framtagningen av standarder och av riktlinjer för exponering är det däremot möjligt att använda dessa och vissa andra mer arbetskrävande beräkningsmetoder.

I IEC-standard 62226-3-1 [23], beskrivs olika metoder för att bestämma den i kroppen inducerade strömtätheten och den inre elektriska fältstyrkan orsakade av ett yttre elektriskt fält. De två storheterna har beräknats med både analytiska och numeriska metoder och i det senare fallet för både en "Reference man" och en "Reference woman". De numeriska modellerna har givits normala kropps mått, men är homogena invändigt. I båda fallen fås högst strömtäthet i ett snitt genom halsen (där tvärsnittsytan är liten). Den normala mannen är något grövre (halsmått 42,5 cm) och strömtätheten blir därför lägre än hos kvinnan med halsmått 36,8 cm. Genom mannens halstvärsnitt fås $2,44 \text{ mA/m}^2$ vid 10 kV/m vertikalt fält och i kvinnan fås $2,86 \text{ mA/m}^2$.

De detaljerade kroppsmodeller som har använts av bl a Dimbylow och av Dawson, Stuchly m fl, omnämns i flera standarder, bl a IEC 62226-3-1 [23] och IEC 62311 [24]. De kommer dock inte till någon direkt användning, utan listas mer för information.

I vissa förslag till standard, bl a i prEN 50499:2006 [25], och det samordnade arbetspapperet inom IEC WG 17 gick man ett steg längre och refererade direkt till Dimbylow's arbeten. Baserat på Dimbylow's relation

mellan yttre B- respektive E-fält och inducerad strömtäthet, definierades "Exposure limit fields for uniform fields". Dessa anger storleken av ett homogent fält, B- eller E-, som ger upphov till en strömtäthet i kroppens kritiska organ på maximalt 10 mA/m². För B-fält anges 1 800 μ T och för E-fält 46 kV/m. Motsvarande "limit fields" finns även för allmänhetens gränsvärde på 2 mA/m².

I den senaste versionen av EN 50499, från december 2008, har dessa "limits fields" tagits bort, medan de ännu finns kvar i IEC WG 17s arbetsdokument. Sådana turer får ses som exempel på den turbulens som råder i nuläget då underlag till det nya EU-direktivet arbetas fram.

En annan intressant möjlighet är att använda "induktionsfaktorer", som föreslås i en artikel av Brakken och Dawson från 2004 [26]. Dessa induktionsfaktorer är en utvecklad form av de "Coupling factors" som återfinns i IEC 62226-2-1 från samma år (2004) [27].

Idén bakom dessa induktionsfaktorer är att inverkan på människokroppen av inhomogena fält är svår att kvantifiera, medan motsvarande av homogena är enklare att beräkna och därtill redan finns publicerade till stor del, både för B- och för E-fält.

Enligt Brakken m fl kan man med hjälp av en induktionsfaktor "omvandla" inverkan av ett inhomogent yttre fält till motsvarande av ett homogent fält. Den normaliserade induktionsfaktorn är en funktion av avståndet mellan källan för fältet och aktuell kroppsdel (närmaste om man ser till hela kroppen). Med ökande avstånd går denna faktor asymptotiskt mot värdet 1,00. Det inhomogena fältet har med andra ord alltid en mindre inverkan än ett homogent fält av samma storlek (mätt eller beräknat) vid ytan av aktuell kroppsdel

Enligt gällande regelverk [1, 2] ökar människokroppens känslighet med frekvensen och aktuella exponeringsvärden har viktats efter detta. Vid 150 Hz är således det aktuella gränsvärdet 1/3 av det vid 50 Hz. Vid 450 Hz 1/9 osv. Detta frekvensberoende har ifrågasatts av Leitgeb [28] som gjort beräkningar med matematiska nervmodeller för myelinerade och icke myelinerade nervfibrer. Han visar att gällande riktvärden kan användas upp till 150 Hz, men att de däröver är väl konservativa, då nervernas reaktioner snabbt minskar med ökande frekvens. I praktiken torde detta ha liten betydelse i anläggningar för 70 kV och uppåt, då innehållet av övertoner är ringa vid dessa spänningsnivåer.

Olika möjligheter att begränsa exponeringen diskuteras i några artiklar. Framförallt behandlar dessa s k ledande dräkter och möjligheten att begränsa det elektriska fältet. En god översikt av olika typer av dräkter ges i en IEEE-artikel från 1997 [29]. Att materialet är drygt 10 år gammalt torde inte spela så stor roll, då utvecklingen inte sker så snabbt på detta område. Tidigare tillverkades dräkter med ett ledande "nät" med en maskvid varierande mellan 2 och 5 mm. Idag kan garnet innehålla upp till 25 % tunna rostfria trådar med en diameter av 8-16 μ m och maskvidden blir därmed i praktiken < 1 mm. Tyget kan få en resistans som varierar mellan 5 ohm och 100 ohm, men det lär också finnas använda tyger med en resistans upp mot 100 kohm. För dräkten som helhet, med förbindningar mellan olika delar, fås vanligen en resistans i storleksordningen upp till några hundra ohm. Ett värde som

dessutom kan öka betydligt efter användning och framförallt efter ett antal tvättar. Det finns också en särskild IEC-standard – IEC 60695 – för ledande dräkter [30]. I standarden tas frågor upp som rör både tyg och färdig dräkt. Till tyget hör brännbarhet, skärmning (min 40 dB) och kontroll av förmågan att klara 10 tvättar i en specificerad tvättmaskin. Till hela dräkten hör skärmning och kontroll av resistansen mätt mellan dräktens olika delar. För en ny komplett dräkt krävs < 50 ohm mellan "ytterpunkter" och för en använd dräkt < 100 ohm.

Vid ISH-konferensen 2007 publicerades ett arbete rörande avskärmning av det magnetiska fältet med dräkter av olika material och permeabilitet [31]. Man redovisar i artikeln jämförande beräkningar med enkel människomodell och en realistisk arbetsposition invid en strömförande ledare. Med koppar i dräkten med den relativa permeabiliteten $= 1$ (μ_r) fås $9,8 \text{ mA/m}^2$ i hjärnan. Med "silicon" ($\mu_r = 8\,000$) fås $2,1 \text{ mA/m}^2$ och med permalloy ($\mu_r = 38\,000$) fås $0,3 \text{ mA/m}^2$. Med en helt oskärmad kropp fås maximalt 20 mA/m^2 i hjärnan. Även om artikeln pekar på intressanta möjligheter, torde mer praktiska tillämpningar ligga ännu ett antal år fram i tiden.

Cigré har under senare år givit ut ett par publikationer inom detta område, men de är främst inriktade på fält och fälteffekter som radiostörningar och ljud i markytans nivå [32], respektive på att beskriva olika karakteristika (olika strömmedelvärden, obalans etc) för att komplettera magnetfältsmätningar [33].

3 Gränsvärden och riktvärden för exponering

I dagsläget (våren 2009) är situationen något oklar vad det gäller gränsvärden och insatsvärden för arbetstagares exponering för elektriska och magnetiska fält. Sedan 1998 har bedömningar kunnat baseras på ICNIRP Guidelines [1]. Detta dokument låg sedan också till grund för EU's rekommendation för allmänhetens exponering från 1999 [34] och för EU's direktiv för arbetstagares exponering från 2004 [2]. EU's direktiv kom att bli diskuterat och dess tekniska underlag i form av ICNIRP Guidelines kom att ifrågasättas. I oktober 2007 valde därför EU att flytta fram ikraftträdandet för EMF-direktivet från planerat våren 2008 till våren 2012. Vid ungefär samma tid meddelades det att ICNIRP skulle ta fram en reviderad utgåva av sina Guidelines.

I april 2009 meddelades att nya riktlinjer från ICNIRP kan förväntas före årets slut och att EU kan komma med ett förslag till nytt EMF-direktiv senast i april månad 2010. Ett år senare, i april 2011, kan parlamentet ta ställning till ett nytt direktiv, med planerat införande i april 2012.

Den studie som redovisas i denna rapport bör givetvis inkludera någon form av bedömning mot internationella riktlinjer. En möjlighet är att endast redovisa aktuella fältnivåer och lämna bedömningen till dess att nya riktlinjer finns att tillgå, men detta kommer sannolikt att upplevas som besvärande av läsarna. Något säkert budskap om hur och i vilken omfattning existerande riktvärden kommer att ändras finns tyvärr inte.

I brist på annat material har därför denna studie baserats på existerande regelverk, dvs ICNIRP Guidelines från 1998 och EU-direktivet från 2004.

ICNIRP och EU skiljer mellan gränsvärden och insatsvärden/referensnivåer.

Gränsvärdet för exponering är en i kroppen och av det yttre fältet inducerad strömtäthet (mA/m^2). Denna har bestämts utifrån känd och omedelbar påverkan på främst det centrala nervsystemet. Detta innebär att det är strömtätheten i huvud och delar av bålarna som är av intresse. Högre värden kan alltså tillåtas i t ex händer och fötter.

Frekvensområde	Arbetstagare (mA/m^2)	Allmänheten (mA/m^2)
Gränsvärde vid 50 Hz	10 mA/m^2	2 mA/m^2
Gränsvärde vid:		
f = 1 - 4 Hz	40/f	8/f
f = 4 Hz - 1 kHz	10	2
f = 1 - 400 kHz	f/100	f/500

Tabell 1. Gränsvärden för exponering enligt ICNIRP och EU.

Skillnaden i gränsvärde motiveras av att gruppen arbetstagare anses vara medveten om sin exponering och skall ha möjlighet att skydda sig mot denna och kunna begränsa varaktigheten av en exponering. Allmänheten, däremot, är en inhomogen grupp som kan inkludera särskilt känsliga individer som barn, gamla och personer som är påverkade av medicinering och implantat.

Utifrån gränsvärdet har de elektriska och magnetiska fälten beräknats (referensnivåer eller insatsvärden). Detta har skett under antagandet om maximal koppling mellan yttre fält och strömtäthet.

Följande referensnivåer eller insatsvärden gäller:

Frekvensområde	Arbetstagare	
	B- fält (μT)	E-fält (V/m)
Insatsvärde vid 50 Hz	500 μT	10 000 V/m
Insatsvärde vid $f = 1 - 8 \text{ Hz}$	$2 \times 10^5/f^2$	20 000
$f = 8 - 25 \text{ Hz}$	$2,5 \times 10^4/f$	20 000
$f = 0,025 - 0,82 \text{ kHz}$	$25/f$	500/f
$f = 0,82 - 65 \text{ kHz}$	30,7	610
$f = 0,065 - 1,0 \text{ MHz}$	$2,0/f$	610

Tabell 2. Översikt referensnivåer eller insatsvärden för arbetstagare enligt ICNIRP och EU.

Frekvensområde	Allmänheten	
	B- fält (μT)	E-fält (V/m)
Insatsvärde vid 50 Hz	100 μT	5 000 V/m
Insatsvärde vid $f = 1 - 8 \text{ Hz}$	$4 \times 10^4/f^2$	10 000
$f = 8 - 25 \text{ Hz}$	$5 000/f$	10 000
$f = 0,025 - 0,8 \text{ kHz}$	$5/f$	250/f
$f = 0,8 - 3 \text{ kHz}$	6,25	250/f
$f = 3 - 150 \text{ kHz}$	6,25	87
$f = 0,15 - 1,0 \text{ MHz}$	$0,92/f$	87

Tabell 3. Översikt referensnivåer eller insatsvärden för allmänheten enligt ICNIRP och EU.

I ICNIRP Guidelines, men inte i EU-direktivet, finns följande avsnitt i den löpande texten som gäller arbetstagares exponering: *For the specific case of occupational exposure at frequencies up to 100 kHz, the derived electric fields can be increased by a factor of 2 under the conditions in which adverse indirect effects from contact with electrically charged conductors can be*

excluded. Det skulle således i vissa fall vara möjligt att höja insatsvärdet från 10 kV/m vid 50 Hz till 20 kV/m.

Baserat på numeriska beräkningar utfärda av Dimbylow m fl [12-22] har det i ett förslag till standard [25] presenterats nivåer för homogena fält som i kritiska organ, som hjärnan, ryggraden och näthinnan, ger en strömtäthet på maximalt 10 mA/m². Dessa högre nivåer för fält betecknas "Exposure limit fields for uniform fields".

- För den elektriska fältstyrkan är "Exposure limit field" 46 kV/m
- För den magnetiska flödestätheten är "Exposure limit field" 1 800 µT.

Dessa värden motsvarar den mest kritiska exponeringen enligt Dimbylow [21]. Exponering för magnetiska fält redovisas där i *Table 3* och *Table 8* och exponering för elektriska fält i *Table 4* och *Table 9*. För det magnetiska fältet har tre fall med homogent fält studerats; AP - yttre fält riktat bröst-rygg, LAT - fält riktat sida-sida och TOP - fält riktat huvud-fot. För det elektriska fältet finns två beräkningsfall. Dels ett homogent fält som infaller vertikalt mot en upprättstående person som är isolerad från jord och dels ett fall där personen är i kontakt med jord via fotsulorna. För både de magnetiska och de elektriska fallen redovisas strömtätheten uttryckt som ett medelvärde över 1 cm² vävnad. Beräkningarna har genomförts med olika konduktivitetsvärden för aktuella organ, vilket givetvis påverkar resultatet. Här återgivna värden gäller för normala värden på konduktiviteten för respektive vävnad.

I fallet med ett magnetiskt fält redovisar Dimbylow den högsta strömtätheten i näthinnan och för ett fält riktat bröst-rygg. I den manliga beräkningsmodellen NORMAN fås 5,50 mA/m² vid 1 mT och i den kvinnliga modellen NAOMI fås i motsvarande fall 4,89 mA/m². Räknat på ett gränsvärde om 10 mA/m² fås ett högsta acceptabelt B-fält på $1/0,55 = 1,82$ mT.

För elektriskt fält redovisar Dimbylow den högsta strömtätheten i modellen NAOMI när kroppen är jordad via fötterna. För detta fall fås 0,217 mA/m² i näthinnan. Räknat på ett gränsvärde om 10 mA/m² fås ett högsta acceptabelt E-fält på $1/0,217 = 46,1$ kV/m. Med kroppen isolerad från jord fås 40-50 % lägre strömtäthet.

Det förutsätts i dessa beräkningar att fältet är homogent, men detta är ett idealfall och kan möjligen närmast motsvaras av situationen på marken under kraftledningen. Närmare faslinorna kan fältet vara kraftigt inhomogent. Exponering för inhomogena magnetiska fält omnämns i [25] och [27]. Även forskargruppen runt beräkningsmodellen UVic (University of Victoria) har publicerat beräkningar med inhomogena B-fält [19]. Bracken och Dawson redovisar i [26] omfattande beräkningar och introducerar begreppet *Non-uniform induction factor*. Man visar att denna faktor ligger mellan ca 0,5 och 1,0 för rimliga arbetsavstånd. Med enklare modeller visas i IEC-standarden 62226-2-1 [27] att strömtätheten orsakad av ett inhomogent B-fält är generellt lägre än den som orsakas av ett homogent fält av en storlek motsvarande det inhomogena fältets maxvärde i aktuell vävnad. Skillnaden mellan de två fallen beror av graden av inhomogenitet och är svår att kvantifiera för verkliga fall. Att som i förslaget till ny standard [25] förutsätta att fältet är homogent ger en positiv säkerhetsmarginal, även om storleken därav är okänd. Vid en bedömning skall det homogena fältets storlek sättas

lika med det verkliga fältet storlek, mätt eller beräknat i den del av aktuell vävnad eller organ som ligger närmast källan för fältet. Vid normalt arbete, med huvud och kropp vänd mot källan, kan man t ex mäta fältets storlek vid pannan.

Antagandet om ett vertikalt E-fält kan också ge en positiv säkerhetsmarginal. I en utsträckt kropp, som människan, som exponeras för ett elektriskt fält, fås den högsta inre strömtäthet när fältets riktning sammanfaller med kroppens längdaxel. Detta visas för homogena kroppar i bl a IEC-standard 62226-3-1 [23]. För en sfäroid med "mänskliga" proportioner ($L=1,76$ m och $R=0,178$ m) fås vid ett yttre E-fält på 1 kV/m riktat parallellt med längdaxeln, en inre strömtäthet på $0,134$ mA/m². Med fältet riktat vinkelrätt mot längdaxeln fås en inre strömtäthet på knappt $0,010$ mA/m². Även om det i detta fall är svårt att kvantifiera vinsten med ett fält i annan riktning än längs kroppen längdaxel, ger varje avvikelse en positiv marginal.

4 Arbete och avstånd

4.1 Arbete

TVå huvudtyper av arbete kan förekomma i närheten av luftledningar:

- Underhåll på ledning och röjning av ledningsgata.
- Annat arbete i ledningens närhet, t ex skogstransporter, jordbruksarbete etc.

Underhållsarbete utförs av särskilt utbildad personal som är medvetna om förekommande fält och dess konsekvenser. Arbete kan utföras i princip överallt; på mark, i stolpar och vid AMS-arbete – även mycket nära fasledarna. Kontakt med jordade föremål som stolpar och stag kan förekomma.

Annat arbete kan utföras av personal som inte nödvändigtvis är medvetna om fält och exponering. Dessa personer hänförs till gruppen Allmänheten. Arbete utförs huvudsakligen på marken, både nära stolpar och ute i spannet. Kontakt med jordade föremål som stolpar och stag kan förekomma.

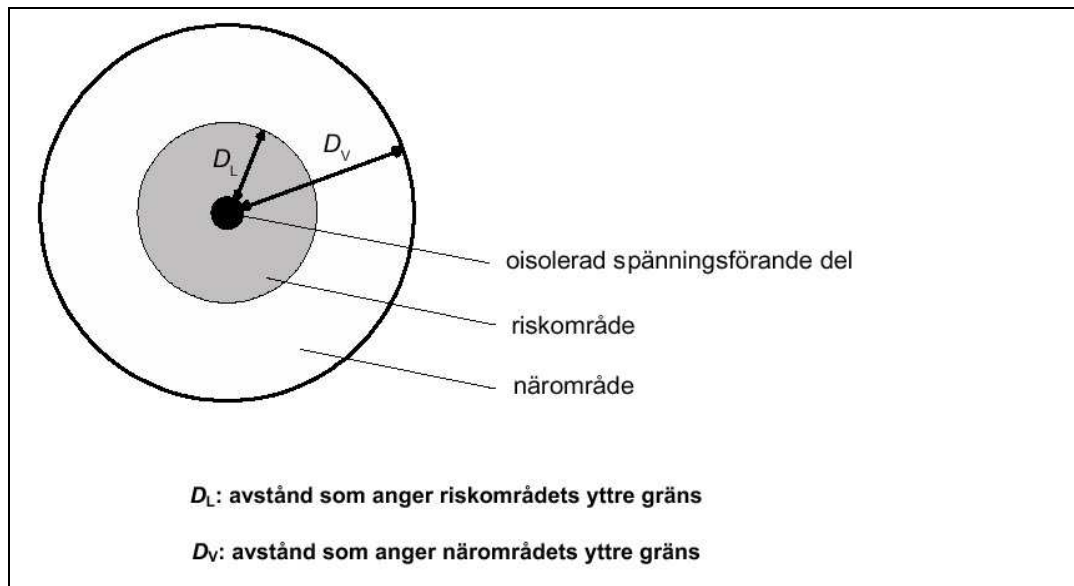
Detta innebär i praktiken att människor kan befinna sig var som helst i ledningars närhet.

4.2 Riskområde och närområde

De olika arbetsuppgifterna kan även delas in efter var de utförs, d v s efter avstånd till spänningsförande del. Området närmast spänningssatt föremål benämns *Riskområde* och området därutöver benämns *Närområde*. Se Figur 1. Avståndet från spänningssatt del ut till den yttre gränsen för respektive område beror av spänningsnivån och olika bedömningar man gjort av risken för överslag och behovet av tillägg för ofrivilliga kroppsrörelser mm. Avstånden ges för ett antal spänningsnivåer i SS-EN 50 110-1:2005 [35] och återges i Tabell 4.

Risk- och närområde styr typen av arbete. Följande återges från samma standard enligt ovan:

"Arbete Med Spänning: Arbetsmetod vid vilken arbetare medvetet kommer i beröring med spänningsförande delar eller kommer inom riskområdet med kroppsdel eller med verktyg, utrustning eller anordning. ANM – Vid lågspänning räknas ett arbete som arbete med spänning när man kommer i kontakt med oisolerade spänningsförande delar. Vid högspänning räknas ett arbete som arbete med spänning när man kommer in i riskområdet, även om man inte kommer i kontakt med spänningsförande delar."



Figur 1. Riskområde och närområde enligt SS-EN 50 110-1 [35].

Det finns tre alternativa arbetsmetoder enligt SS-EN 50 110-1:2005 och som definieras på följande sätt:

"Arbete Med Spänning: Arbetsmetod vid vilken en arbetare kommer i beröring med spänningsförande delar eller kommer inom riskområdet med kroppsdel eller med verktyg, utrustning eller anordning."

och

"Arbete Nära Spänning: Arbetsmetod vid vilken en arbetare medvetet kommer in i närområdet utan att nå riskområdet med kroppsdel eller med verktyg eller något annat föremål."

och

"Arbete Utan Spänning: Arbetsmetod på elektrisk anläggning som varken är spänningsförande eller uppladdad och som utförs efter det att alla åtgärder vidtagits för att förebygga elektrisk fara."

För närvarande finns det tre erkända arbetsmetoder för Arbete Med Spänning beroende på hur montören befinner sig i förhållande till spänningsförande delar:

"Isolerstångsmetoden: Vid denna metod befinner sig arbetaren på ett bestämt avstånd från spänningsförande delar och arbetet utförs med hjälp av isolerande stänger."

"Isolerhandskmetoden: Vid denna metod är arbetaren i direkt mekanisk kontakt med spänningsförande delar och är elektriskt skyddad av isolerande handskar och om möjligt isolerande armskydd."

"Barhandsmetoden: Vid denna metod befinner sig arbetaren på samma potential som de spänningsförande delarna och i direkt beröring med dessa samt på lämpligt sätt isolerad från omgivningen."

Detta innebär att området förhållandevis nära fasledarna är förbehållet personal som utför någon form av Arbete Med Spänning. Vid dessa spänningar (> 70 kV) är endast stång- och barhandsmetoderna tillämplbara och endast den senare kan medföra att personal kommer innanför riskområdets yttre gräns. Riskområdet kan nås via isolerande stegar eller via någon form av isolerande lift.

Nominell system-spänning U_N (kV)	Minsta godtagbara avstånd i luft till riskområdets yttre gräns, D_L (mm)	Minsta godtagbara avstånd i luft till närområdets yttre gräns D_V (mm)
70	750	1 750
110	1 000	2 000
132	1 100	3 000
150	1 200	3 000
220	1 600	3 000
275	1 900	4 000
300	2 100	4 000
380	2 500	4 000
400	2 700	5 100
420	2 800	5 300
480	3 200	6 100

Tabell 4. Avstånd till Risk- och Närområdets yttre gräns enligt SS-EN 50 110-1:2005 [35]. Värden för 300, 400 och 420 kV är framtagna genom linjär interpolation.

4.3 Icke elektriskt arbete, Arbete Nära Spänning och Särskilda arbeten

Icke elektriskt arbete kan vara byggnadsarbete, transporter eller annat arbete under eller bredvid en luftledning. Utrustning och personal kan befinna sig på marknivå eller på viss höjd ovan marken. Avståndet mellan spänningsförande del (faslina) och arbetare/utrustning skall vara minst lika med D_V .

För icke elektriskt arbete är fältet 1 – 2 m ovan markytan av intresse. I princip kan det också förekomma arbete på högre höjd, men det är då

vanligen kranarmar eller last och sällan personer som befinner sig på högre höjd.

Arbete Nära Spänning är allt arbete inom närområdet, men som inte inbegriper riskområdet. Røjning av skogsgata kan vara Arbete Nära Spänning eller särskilt arbete med spänning, beroende på avstånd mellan faslina och arbetsställe. Vid Arbete Nära Spänning skall personalen vara instruerad om säkerhetsavstånd och andra säkerhetsåtgärder.

Isolatorkontroll från stolpben är ett exempel på särskilda arbeten med spänning. För denna typ av arbete skall det finnas särskilda instruktioner och personalen skall vara fackkunnig eller instruerad.

4.4 Arbete Med Spänning

Arbete Med Spänning (AMS) är allt arbete inom riskområdet. Montören kan finna sig ovan, bredvid eller under faslinan och även i området mellan två faser. Avståndet till närmaste faslina beror av arbetsuppgift och -metod och kan variera från någon enstaka decimeter vid barhandsarbete till några meter vid arbete med isolerstång.

Särskilt kännetecknande för AMS är det väl strukturerade arbetet. Personalen skall vara instruerad eller fackkunnig och ha genomgått ett särskilt utbildningsprogram med både teoretiska och praktiska övningar. Färdigheten att utföra arbetet skall upprätthållas antingen genom tillämpning, repetitionsutbildning eller ny utbildning. För arbetet skall det finnas instruktioner som bl a behandlar nödvändiga säkerhetsåtgärder och fastlagda avstånd i luft för personal och för den ledande utrustning som används i arbetet.

Det praktiska arbetet skall alltid inledas med en riskanalys, där tänkbara risker identifieras och åtgärder för att eliminera dessa listas.

Figur 2 - 6 på följande sidor visar några arbetsuppgifter inom detta område.

4.5 Arbetsområde och avstånd vid olika typer av arbete

Olika typer av arbete i närheten av luftledningar har beskrivits. Arbetet kan i korthet klassificeras enligt följande:

- Icke särskilt utbildad eller instruerad personal kan finna sig under och bredvid ledningen och *upp till någon meter över marknivå*. Denna grupp kan ur exponeringssynpunkt jämföras med allmänheten.
- Personer med särskild utbildning eller med instruktioner kan arbeta från stolpben, reglar och i något fall från isolerade stegar och plattformar. *Vid denna typ av arbete kommer montören inte inom riskområdet med någon kroppsdel*. Till denna kategori räknas arbete nära spänning, vissa uppgifter av typen särskilt arbete med spänning och visst Arbete Med Spänning.
- Personer med särskild utbildning *kan finna sig inom riskområdet med kroppsdel*. Visst Arbete Med Spänning räknas till denna kategori.

Arbete kan bedrivas vid stolpen eller på en plats ute i spannet. Exponeringsbetingelserna behöver således beskrivas för två snitt av

ledningen; ett snitt genom stolpen och ett snitt genom den punkt där linorna hänger i minimihöjd. I det följande betecknas snittet genom stolpen med A och snittet i spannets mittpunkt med B.



Figur 2. Arbete med isolerstång från skylift med isolerad bom. I detta fall arbetar man både från ytterfasens "utsida" och en korg i nivå med regeln.

Kombinationen av skylift med isolerad bom och isolerstång ger "dubbla isolationsbarriärer", vilket börjar bli alltmer efterfrågat. Bilden tagen i samband med ESMO-konferensen i Albuquerque, New Mexico, 2006.



Figur 3. Barhandsarbete från lift med isolerad bom. Montören bär en ledande dräkt och har skydd för huvudet. I detta fall står han på faslinans "utsida", men bomen kan manövreras så han även kommer åt mittfasen. Bilden tagen i samband med ESMO-konferensen i Albuquerque, New Mexico, 2006.



Figur 4. Personal från Vattenfall Service byter isolatorkedja på en 220 kV ledning. Arbetet sker med isolerstång. Montörerna står i stolpen och lutar sig något utåt och mot kedjan. Bilden tagen i trakten av Sundsvall i samband med en demonstration av metoden.



Figur 5. Byte av isolatorkedja på en 220 kV ledning. De två montörerna har nu flyttat sig något uppåt längs stolpen. Personal och plats som tidigare bild.



Figur 6. Personal från Vattenfall Service monterar vibrationsdämpare på en ledning för 220 kV. Arbetet sker med isolerstång från stolpen och från en korg monterad på en hydraulbom på en grävmaskin. Eftersom dämparen skall placeras på något avstånd från isolatorn får montören i stolpen luta sig bakåt. Samma arbetsplats som de två tidigare bilderna.

5 Luftledning

Denna studie omfattar luftledningar för 70, 130, 220 och 400 kV, både den elektromagnetiska miljön vid respektive stolpe och miljön i en punkt ute i spannet. Arbetet har begränsats till att endast omfatta s k raklinjestolpar, även om givetvis visst resultat är tillämbart för andra stolptyper.

Ledningarna för 70 och 130 kV antas vara byggda med trästolpar och de för 220 och 400 kV med stålstolpar. Reglarna antas vara jordade.

Såväl spänning som ström har genomgående antagits vara symmetrisk, d v s samma nivå i alla tre faserna. Eventuella topplinor har antagits vara jordade och inte föra någon ström.

Den elektriska fältstyrkan är direkt proportionell mot spänningen och den magnetiska flödestätheten är direkt proportionell mot strömstyrkan, detta gör att resultatet lätt kan räknas om efter andra förutsättningar.

Nedan anges viktiga data för respektive ledning och de varianter som studerats. I vissa fall har beräkningar gjort med något ändrade uppgifter, men detta anges då specifikt i respektive fall. Ledararean kan i vissa fall synas väl tilltagen, men större effektiv diameter ger högre fält på något avstånd från linan och har därför valts för att visa ett extremfall.

För var ledning anges två beräkningsplan eller snitt: A vid stolpen och B vid spannmitt.

5.1 70 kV, fasavstånd 4,0 m (70_4)

Ledning av äldre typ.

Spänning för beräkning av elektriskt fält: 77 kV

Ström för beräkning av magnetiskt fält: 500 A

Fasavstånd: 4,0 m

Fasledare: Simplex 593 mm², d = 31,7 mm

Höjd till fasledare vid stolpen: 10,7 m

Minimihöjd för fasledare: 6,0 m

Ingen topplina

Beräkningssnitt: 70_4_A och 70_4_B

5.2 70 kV, fasavstånd 3,0 m (70_3)

Spänning för beräkning av elektriskt fält: 77 kV

Ström för beräkning av magnetiskt fält: 500 A

Fasavstånd: 3,0 m

Fasledare: Simplex 593 mm², d = 31,7 mm

Höjd till fasledare vid stolpen: 10,7 m

Minimihöjd för fasledare: 6,0 m

Ingen topplina

Beräkningssnitt: 70_3_A och 70_3_B

5.3 130 kV, fasavstånd 5,0 m (130_5)

Ledning av äldre typ.

Spänning för beräkning av elektriskt fält: 135 kV

Ström för beräkning av magnetiskt fält: 500 A

Fasavstånd: 5,0 m

Fasledare: Simplex 910 mm², d = 39,2 mm

Höjd till fasledare vid stolpen: 10,9 m

Minimihöjd för fasledare: 6,5 m

Ingen topplina

Beräkningssnitt: 130_5_A och 70_5_B

5.4 130 kV, fasavstånd 4,0 m (130_4)

Spänning för beräkning av elektriskt fält: 135 kV

Ström för beräkning av magnetiskt fält: 500 A

Fasavstånd: 4,0 m

Fasledare: Simplex 910 mm², d = 39,2 mm

Höjd till fasledare vid stolpen: 13,25 m

Minimihöjd för fasledare: 6,5 m

Ingen topplina

Beräkningssnitt: 130_4_A och 70_4_B

Se Figur 7.



Figur 7. Ledning för 130 kV. Bilden motsvarar beräkningssnitt 130_4_A.

5.5 220 kV, Simplex (220_7,2_S)

Ledning av äldre typ.

Spänning för beräkning av elektriskt fält: 220 kV

Ström för beräkning av magnetiskt fält: 500 A

Fasavstånd: 7,2 m

Fasledare: Simplex 910 mm², d = 39,2 mm

Höjd till fasledare vid stolpen: 15,4 m

Minimihöjd för fasledare: 7,0 m

Topplina: 2 st 329 mm², d = 23,6 mm

Avstånd mellan topplinor: 7,2 m

Höjd till topplina: 22,0 m

Topplinans lägsta höjd i spannet: 13,6 m

Beräkningssnitt: 220_7,2_S_A och 220_7,2_S_B

5.6 220 kV, Duplex (220_7,2_D)

Spänning för beräkning av elektriskt fält: 220 kV

Ström för beräkning av magnetiskt fält: 500 A

Fasavstånd: 7,2 m

Fasledare: Duplex 910 mm², d = 39,2 mm, c-c 450 mm

Höjd till fasledare vid stolpen: 15,4 m

Minimihöjd för fasledare: 7,0 m

Topplina: 2 st 329 mm², d = 23,6 mm

Avstånd mellan topplinor: 7,2 m

Höjd till topplina: 19,0 m

Topplinans lägsta höjd i spannet: 10,6 m

Beräkningssnitt: 220_7,2_D_A och 220_7,2_D_B

5.7 400 kV, fasavstånd 12 m, Duplex (420_12,0)

Ostagad stolpe från perioden 1951-1954.

Spänning för beräkning av elektriskt fält: 420 kV

Ström för beräkning av magnetiskt fält: 500 A

Fasavstånd: 12,0 m

Fasledare: Duplex 910 mm², d = 39,2 mm, c-c 450 mm

Höjd till fasledare vid stolpen: 22,0 m

Minimihöjd för fasledare: 7,8 m

Topplina: 2 st 329 mm², d = 23,6 mm

Avstånd mellan topplinor: 17,0 m

Höjd till topplina: 29,8 m

Topplinans lägsta höjd i spannet: 15,0 m

Beräkningssnitt: 400_12_A och 400_12_B

5.8 400 kV, fasavstånd 11 m, Triplex (420_11,0)

Stagad stolpe från perioden 1958-1965.

Spänning för beräkning av elektriskt fält: 420 kV

Ström för beräkning av magnetiskt fält: 500 A

Fasavstånd: 11,0 m

Fasledare: Triplex 910 mm², d = 39,2 mm, c-c 450 mm

Höjd till fasledare vid stolpen: 22,0 m

Minimihöjd för fasledare: 7,8 m

Topplina: 2 st 329 mm², d = 23,6 mm

Avstånd mellan topplinor: 12,6 m

Höjd till topplina: 29,8 m

Topplinans lägsta höjd i spannet: 15,0 m

Beräkningssnitt: 400_11_A och 400_11_B

5.9 400 kV, fasavstånd 9 m, Triplex (420_9,0)

Stolptyp A1. Stagad stolpe med lutande stolpben 1/6, från perioden 1969-86.

Spänning för beräkning av elektriskt fält: 410-420 kV

(410 kV vid numeriska beräkningar och 420 kV vid analytiska beräkningar)

Ström för beräkning av magnetiskt fält: 500 A

Fasavstånd: 9,0 m

Fasledare: Triplex 910 mm², d = 39,2 mm, c-c 450 mm

Höjd till fasledare vid stolpen: 21,6 m

Minimihöjd för fasledare: 7,8 m

Topplina: 2 st 329 mm², d = 23,6 mm

Avstånd mellan topplinor: 8,8 m

Höjd till topplina: 33,0 m

Topplinans lägsta höjd i spannet: 15,4 m

Beräkningssnitt: 400_9_A och 400_9_B

6 Beräkningar

Den elektriska fältstyrkan (E-fältet) och den magnetiska flödestätheten (B-fältet) har beräknats med både analytiska och numeriska metoder. Generellt gäller att luftledningarna i många stycken har en enkel geometri och lämpar sig väl för analytiska 2-dimensionella beräkningar. De har här använts för beräkningar utan hänsyn tagen till stolpar, regler och andra jordade detaljer. Beräkningarna går snabbt att utföra och har dels använts för att studera fältet på något avstånd från jordade detaljer och dels studera inverkan av olika parametrar som linhöjd, fasavstånd mm. För att få med inverkan av stolpben, regler mm måste man däremot använda numeriska beräkningar som kan hantera 3-dimensionella modeller.

Beräkningarna kan delas in i tre grupper beroende på område:

- Fält vid markytan och någon meter däröver.
- Fält i fasledarnas närhet
- Fält invid stolpben, regler och andra detaljer.

Resultat från båda beräkningsalternativen har jämförts och slutsatser har kunnat dras om var numeriska beräkningar blir ett krav och var det räcker med att göra enklare och snabbare analytiska beräkningar.

6.1 Analytiska beräkningar

6.1.1 Elektrisk fältstyrka

Den elektriska fältstyrkan har beräknats med en metod som anvisas i "Transmission Line Reference Book. 345 kV and Above" [36]. Metoden bygger på att ledarna ersätts med ekvivalenta linjeladdningar och E-fältet beräknas sedan som summan av fältet från de olika laddningarna, med hänsyn till fasläget. Vertikala fältkomponenter adderas för sig och horisontella för sig. Varje ledare har en spegelledare under jordplanet och metoden förutsätter horisontella och parallella ledare över en perfekt ledande jord.

För att underlätta beräkningsarbetet har ett enkelt program skapats i Mathcad. Programmet redovisar fältet både i form av konturplottar, grafer och resultatdata för export till Excel. Resultatet ges i form av totalfält och horisontala och vertikala komponenter.

6.1.2 Magnetisk flödestäthet

Även den magnetiska flödestätheten har beräknats enligt en metod som anvisats i "Transmission Line Reference Book. 345 kV and Above" [36]. Metoden bygger på Biot-Savart's lag och fältet från var strömförande ledare adderas med hänsyn tagen till strömmens fasläge. Vertikala fältkomponenter adderas för sig och horisontella för sig.

Även i detta fall har beräkningsarbetet underlättats genom ett enkelt program i Matcad. Precis som i fallet för E-fält, redovisar programmet fältet både i form av konturplottar, grafer och resultatdata för export till Excel. Resultatet ges i form av totalfält och horisontala och vertikala komponenter.

6.2 Numeriska beräkningar

3-dimensionella numeriska beräkningar används för att kunna studera komplicerade geometrier, som inom ett begränsat område innehåller föremål uppbyggda av många detaljer. Till exempel kan det vara intressant att se vad som händer med det elektriska fältet intill fackverkstolpar när faslinorna inte är speciellt långt borta eller vad som händer med det magnetiska fältet intill en stål balk i en kraftledningsstolpe. Beräkningarna ger möjlighet att förstå hur de ledande och magnetiska egenskaperna hos stål förändrar fältbilden i närheten av konstruktioner. Detta i sin tur gör det lättare att välja arbetsrutiner som innebär lägre fältnivåer. I det här projektet har COMSOL:s finitelementprogram Multiphysics använts, version 3.3 för beräkning av det elektriska fältet och version 3.4 vid senare beräkning av den magnetiska flödestätheten.

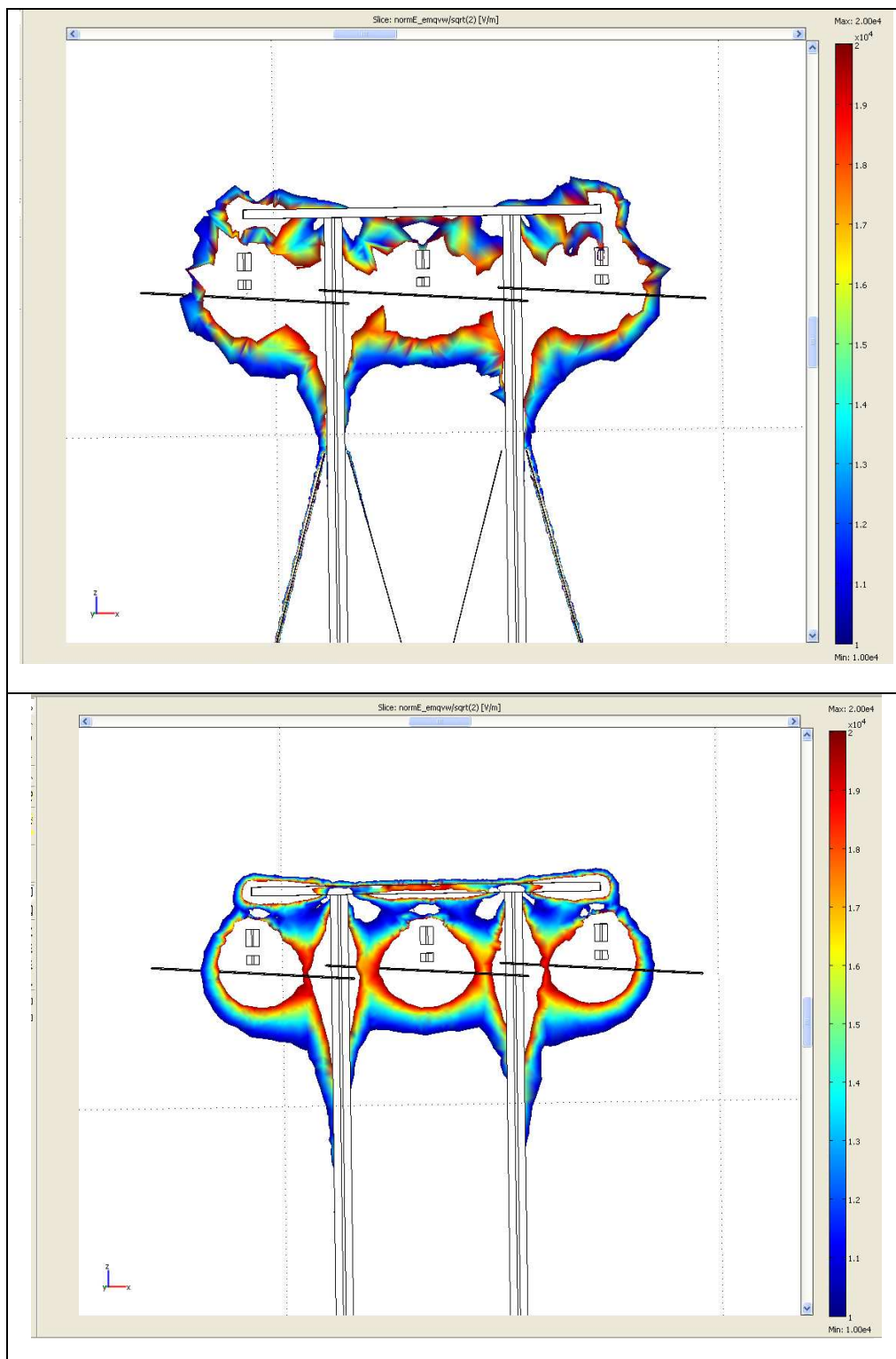
I programmet ansätts värden på de olika delarna som ingår i modellen redan från början. Formlerna för beräkningarna finns i programmet. I modellen ritas de ingående föremålen som skall studeras och vid beräkning av det elektriska fältet tilldelas de olika föremålen potentialer, såsom fasspänningar och jordpotential. För beräkning av det magnetiska fältet är det fasledarnas belastningsströmmar, konstruktionsdetaljers resistivitet och permeabilitet samt markens resistivitet som anges i programmet.

Nackdelen med denna typ av program är att det åtgår stor datorkapacitet, speciellt modeller med små detaljer i en modell som också innehåller stora konstruktionsdetaljer blir tidsödande att beräkna, vilket gör att ett grov-maskigt nät (mesh, programmets elementuppdelning vid beräkningen) måste användas för att beräkningen överhuvudtaget skall kunna genomföras. En alltför grov mesh medför att resultatet tappar i noggrannhet och i värsta fall erhålls inte någon användbar information. Figur 8 visar skillnaden mellan beräkningsresultaten med en "extremely coarse mesh" och med "normal mesh".

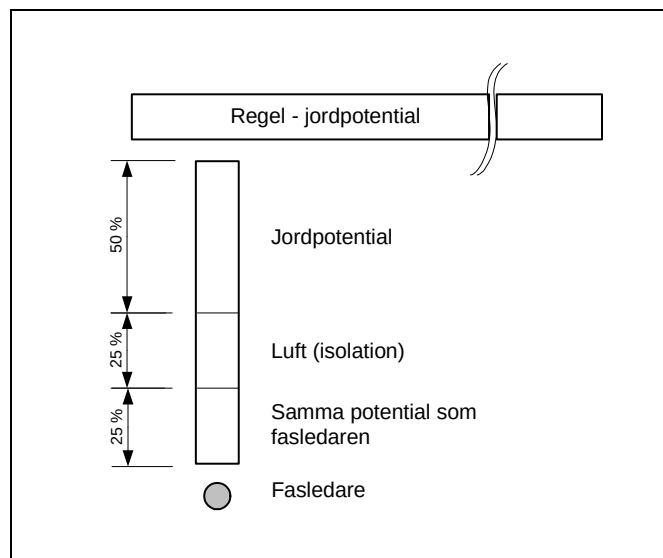
Exempel på detaljer som är svåra att modellera är topplinor och stag på grund av sina relativt små tvärsnittsmått i jämförelse med t.ex. vinkeljärn i ett fackverk, ingående balkar i stolpkonstruktionen etc.

Isolatorkedjorna har modellerats till cirka 100 procent av sin hela längd, med vissa antaganden: Den första fjärdedelen närmast fasledaren har haft samma elektriska potential som respektive fasledare. Den andra fjärdedelen ovanför fasledaren har bestått av ett luftmellanrum och de två övre fjärdedelarna av isolatorn, som är närmast regeln, har i beräkningarna tilldelats nollpotential, dvs. varit jordade, se figur 9.

Vid beräkningarna har samma antaganden gjorts för både trä- och stål stolpar.



Figur 8. Skillnaden mellan "Extremely coarse mesh" i den övre bilden och "Normal mesh" i den undre bilden. Skalans minvärde är 1 kV/m och dess maxvärde är 20 kV/m. Vit färg anger fält utanför dessa nivåer.



Figur 9. Enkel skiss på isolatorernas modellering i förhållande till fasledare och regel. OBS! Ej skalenligt ritat!

6.2.1 Elektrisk fältstyrka

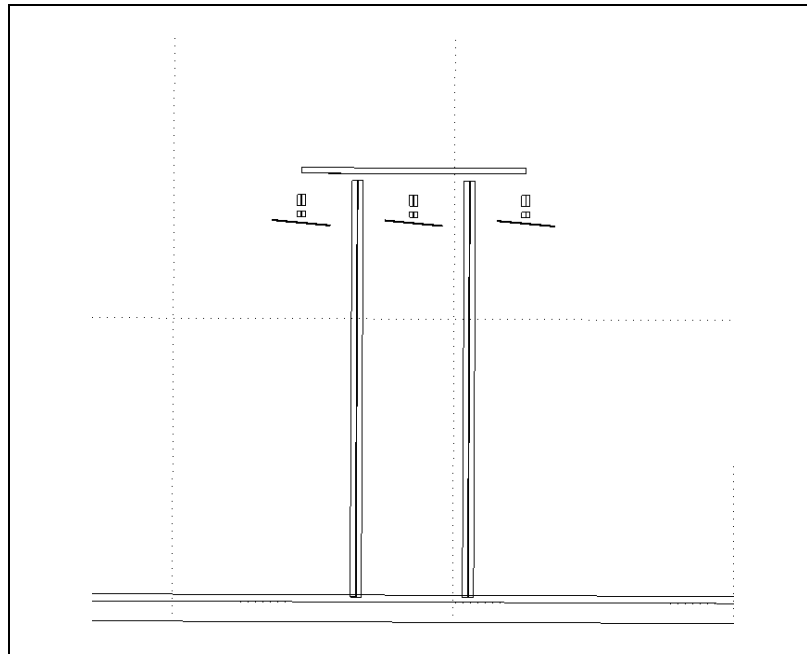
För att beräkna det elektriska fältet har först en kub ritats upp med måtten 40 m x 40 m x 40 m. Inne i kuben har sedan den konstruktion som skall beräknas modellerats med programmets ritverktyg. På kubens insida har väggarna och taket modellerats som elektriskt isolerade. Kubens bottenyta (markplanet) har tilldelats jordpotential. I programmet ansätts de olika detaljerna i modellen med aktuella fasspänningar, elektriska potentialer och elektrisk isolation. Vid beräkningarna av de elektriska fälten har 130 kV-stolpen modellerats enligt figur 10 och 400 kV-stolpen enligt figur 11.

Inuti ledande föremål finns inget elektriskt fält och därför utesluts deras inre från beräkningsmodellen. På utsidan uppkommer laddningar som blir start- eller slutpunkter för fältlinjer.

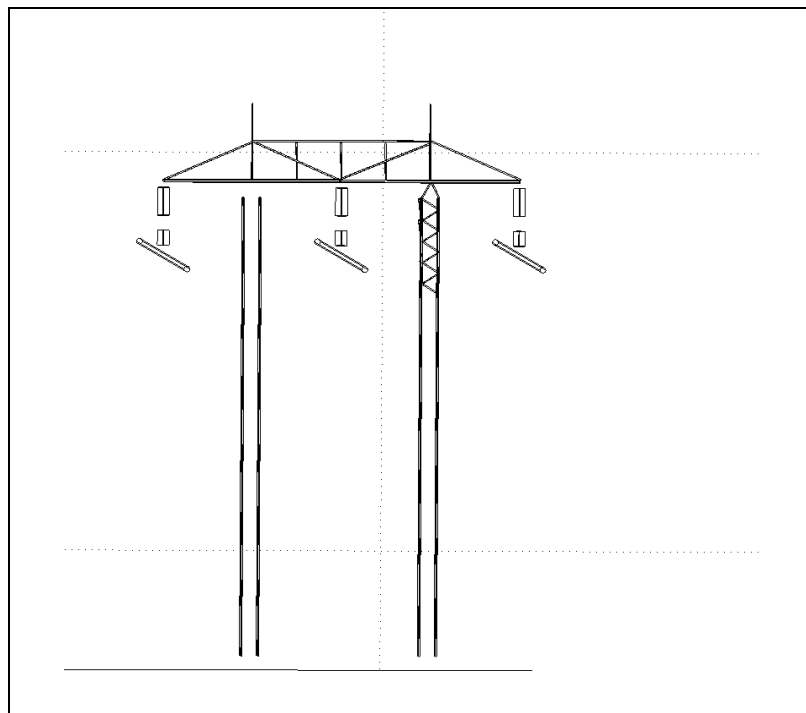
Vid beräkning av den elektriska fältstyrkan från stolpkonstruktioner, har antagits att stolpar, regelverk och topplinor är jordade. För trästolpar innebär detta att stolpen är ledande. I verkligheten är detta ett fall som uppstår när stolpen är regnvåt, dvs. ett extremfall. Om trästolpen för 130 kV istället antas ha en isolerande yta fås det andra extremfallet, stolpen är helt torr. Figurerna 12 och 13 visar skillnaden mellan beräkningarna med de två ytterlighetsfallen; jordade och elektriskt isolerade stolpen.

Med elektriskt isolerade stolpen kommer fältet längs stolpen att vara lägre än 10 kV/m nästan ända upp till regeln, medan fältet med jordade stolpar kan lokalt nå upp till åtminstone 35 kV/m.

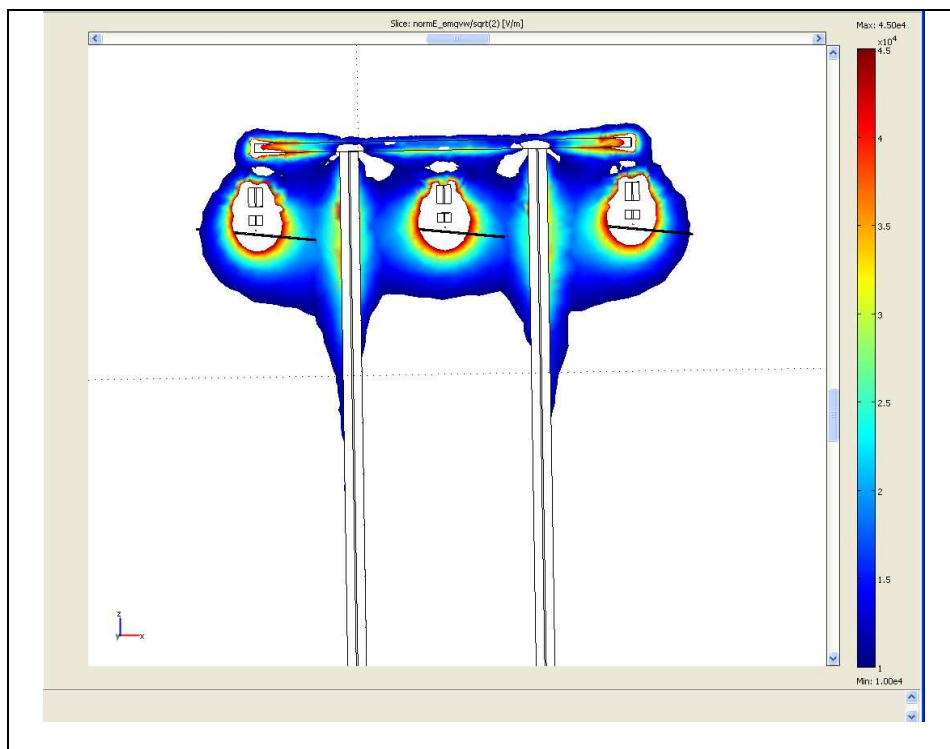
I verkligheten kommer det elektriska fältets storlek att vara någonstans mellan de två beräknade extremfallen.



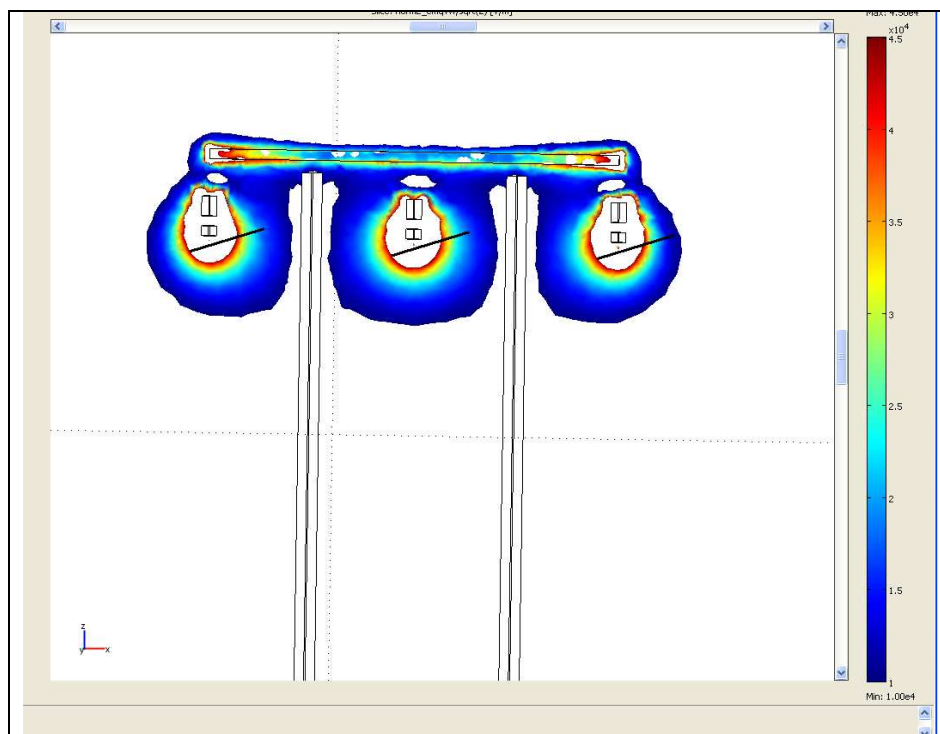
Figur 10. Modell utan staglinor för 130 kV.



Figur 11. Modell för 400 kV. Observera att endast den övre delen av höger stolpben fått fackverkstruktur. Detta för att begränsa modellens storlek.

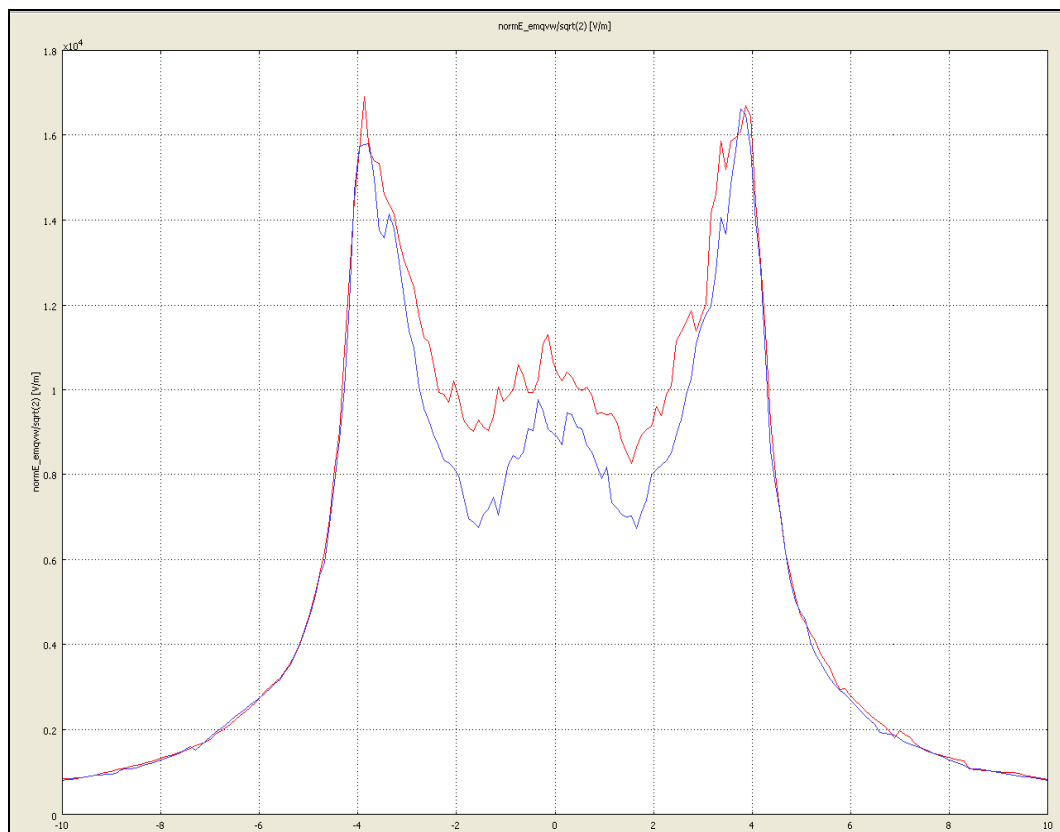


Figur 12 Beräkningar för 130 kV med trästolpbenen jordade.
Skalan omfattar 10 – 45 kV/m. Vit färg anger fält utanför dessa nivåer.



Figur 13. Beräkningar för 130 kV med trästolpbenen elektriskt isolerade.
Skalan omfattar 10 – 45 kV/m. Vit färg anger fält utanför dessa nivåer.

Beräkningskurvorna nedan visar på ett annat sätt effekten av jordade eller isolerade stolpben. Kurvorna visar fältstyrkan längs en horisontell linje på avståndet 0,2 meter från stolpens ytterkant (0,4 meter från stolpens centrum) och på höjden 15,1 meter ovan mark, vilket är mitt för regeln. Faslinorna hänger på höjden 13,25 meter och faserna är placerade vid avstånden -4 meter, 0 meter och +4 meter utefter x-axeln i figur 14.



Figur 14. Beräknad elektrisk fältstyrka i nivå med regeln för en 130 kV stolpe, med jordade (röd kurva) och med ojordade (blå kurva) stolpben. Beräknade maxvärden är 16-17 kV/m. Stolpbenen är placerade vid -2 och +2 m. Den vertikala skalan omfattar 0 – 18 kV/m, med 2 kV/m och ruta. Den horisontella skalan sträcker sig från -10 till +10 m, med 2 m per ruta.

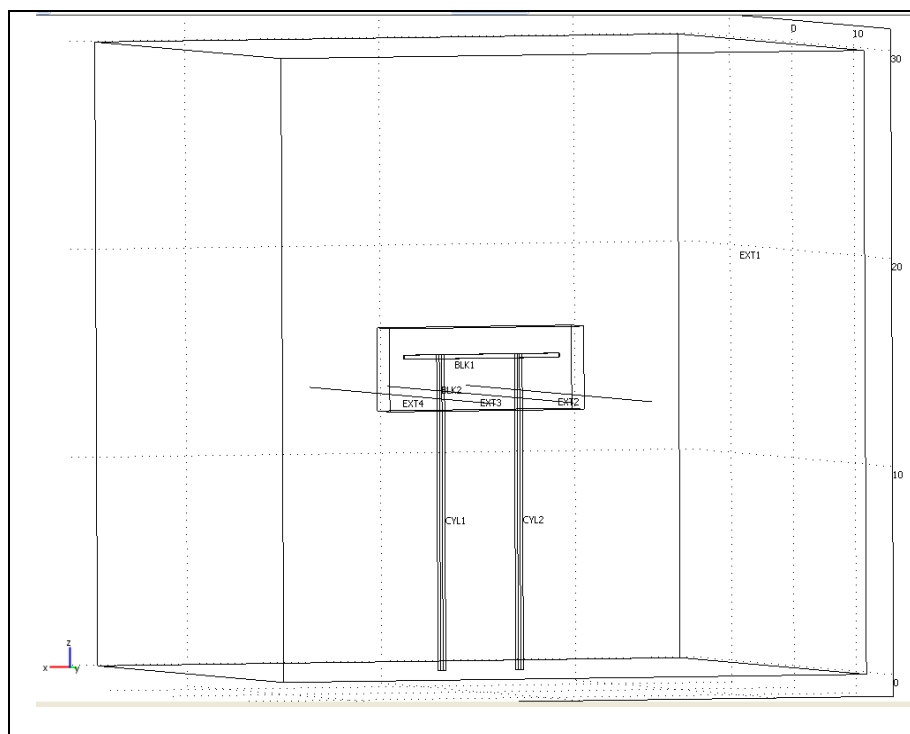
6.2.2 Magnetisk flödestäthet

Det magnetiska fältet passerar de flesta material utan att påverkas nämnvärt, t.ex. trä, mark och murverk etc. Armeringsjärn i väggar har en viss reducerande inverkan. Metallplåtar har en påtaglig inverkan på magnetfältet, på grund av de inducerade strömmarna som uppstår och därmed ger ett motsatt magnetfält i förhållande till källans fält. I ferromagnetiska material koncentreras fältet till materialet, materialet "suger åt sig fältet", och fältet från magnetfältskällan kommer då att gå andra vägar.

I en modell för beräkning av den magnetiska flödestätheten är det metallkonstruktionerna som är viktiga att modellera, t.ex. järnkonstruktioner i

kraftledningsstolpar. Precis som vid beräkning av det elektriska fältet, är det svårt att i modellen blanda konstruktionsdelar som har stora tvärsnittsareor med konstruktionsdelar som har små tvärsnittsareor.

Vid de numeriska B-fältsberäkningarna för en 130 kV-stolpe har en modell byggts med fasledare, en stålregel och två trästolpar. För beräkningarna har modellen inneslutits i en kub med sidorna 30 meter, där detaljerna ritats upp. Därefter har lådan fyllts med beräkningselement (mesh) runt modellen. För att ytterligare förfina elementuppdeleningen i beräkningsmodellen runt fasledarna och regeln har dessa placerats i en "inre låda", se Figur 15.



Figur 15. De modellerade delarna i en 130 kV-trästolpe.

För stålregeln gäller att inträngningsdjupet för induktionsströmmarna är:

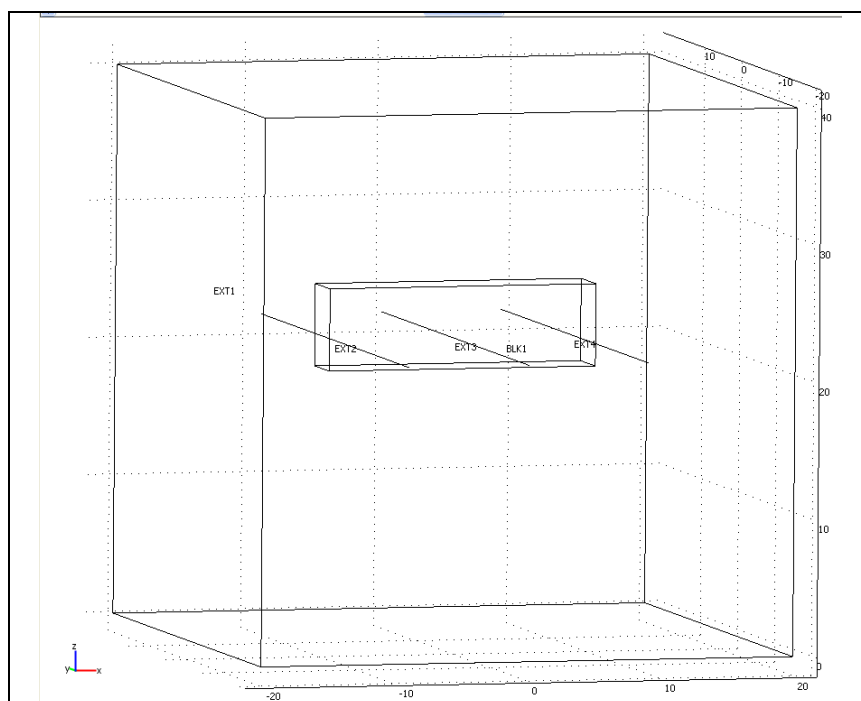
$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}}$$

där ω är vinkelfrekvensen, μ permeabiliteten och σ konduktiviteten

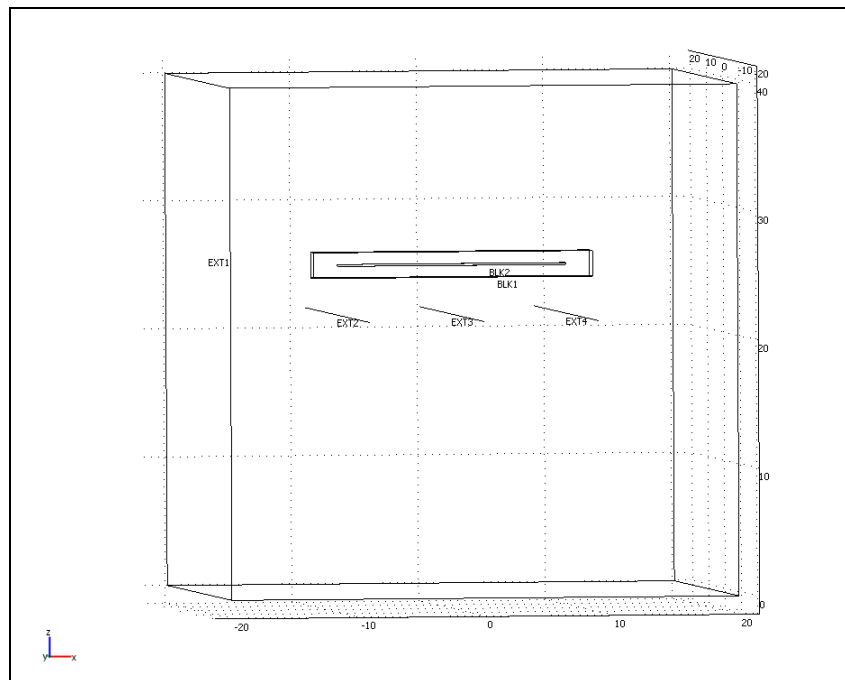
Kombinationen hög permeabilitet och hög konduktivitet ger ett litet inträngningsdjup i regeln. Insidan av regeln har därför uteslutits från modellen och ersatts av inducerade strömmar på regelns yttre yta, "impedance boundary condition". Den relativa permeabiliteten, μ_r , i stålregeln har i beräkningarna satts till 4000.

För motsvarande beräkningar för en 400 kV-stolpe av fackverk, har modellen reducerats till att innehålla enbart fasledare och en balkformad regel. Detta på grund av att fackverksstolpen inte teoretiskt kommer att påverka det magnetiska fältet speciellt mycket och dels för att beräkningarna annars blir mycket omfattande och alltför datorkrävande. Den yttre kubens sidor har satts till 40 m, vilket ger möjlighet att sätta beräkningselement (mesh) runt de modellerade detaljerna i en sådan omfattning att ett tillfredsställande beräkningsresultat erhålls.

För att beräkningsnoggrannheten skall bli så bra som möjligt och beräkningselementen inte skall bli för många har två olika modeller används, dels en som bara visar beräkningarna med fasledarna och dels en som visar beräkningarna med både fasledare och stålregel. I det första fallet har fasledarna varit placerade i en "inre låda", se Figur 16, och i det andra fallet har stålregeln istället varit placerad i en "inre låda", se figur Figur 17.



Figur 16. Modell på bara fasledarna.

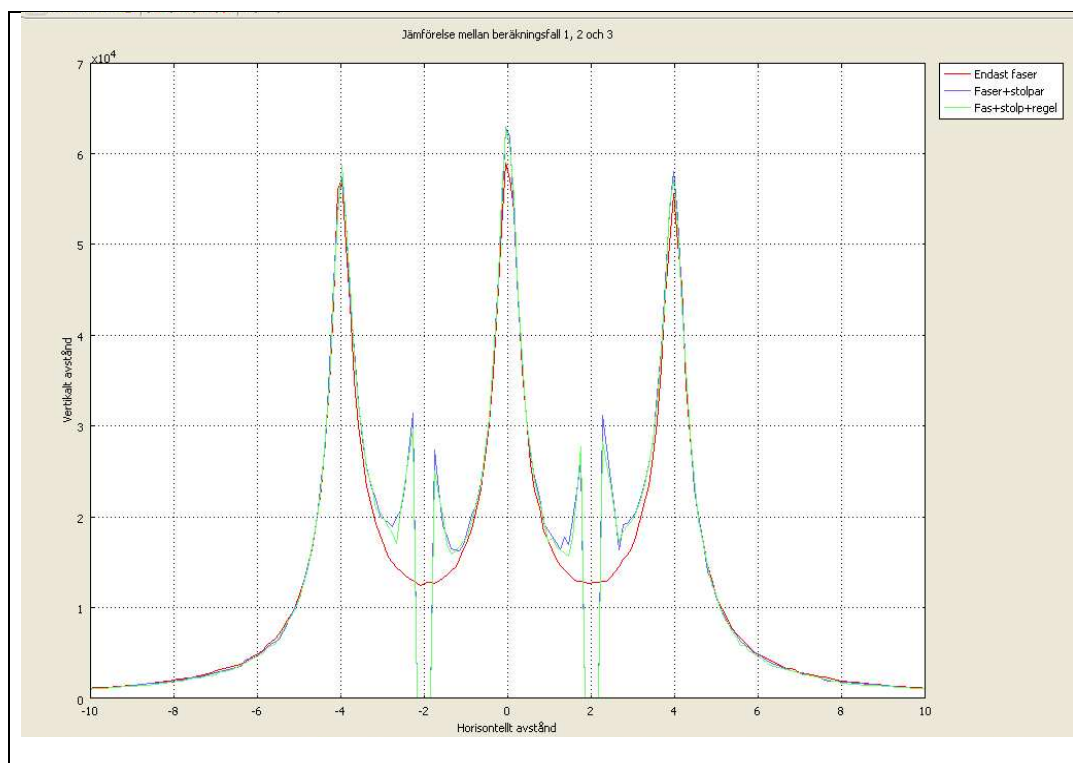


Figur 17. Modell på både fasledare och regel.

7 Resultat och diskussion

7.1 Elektrisk fältstyrka

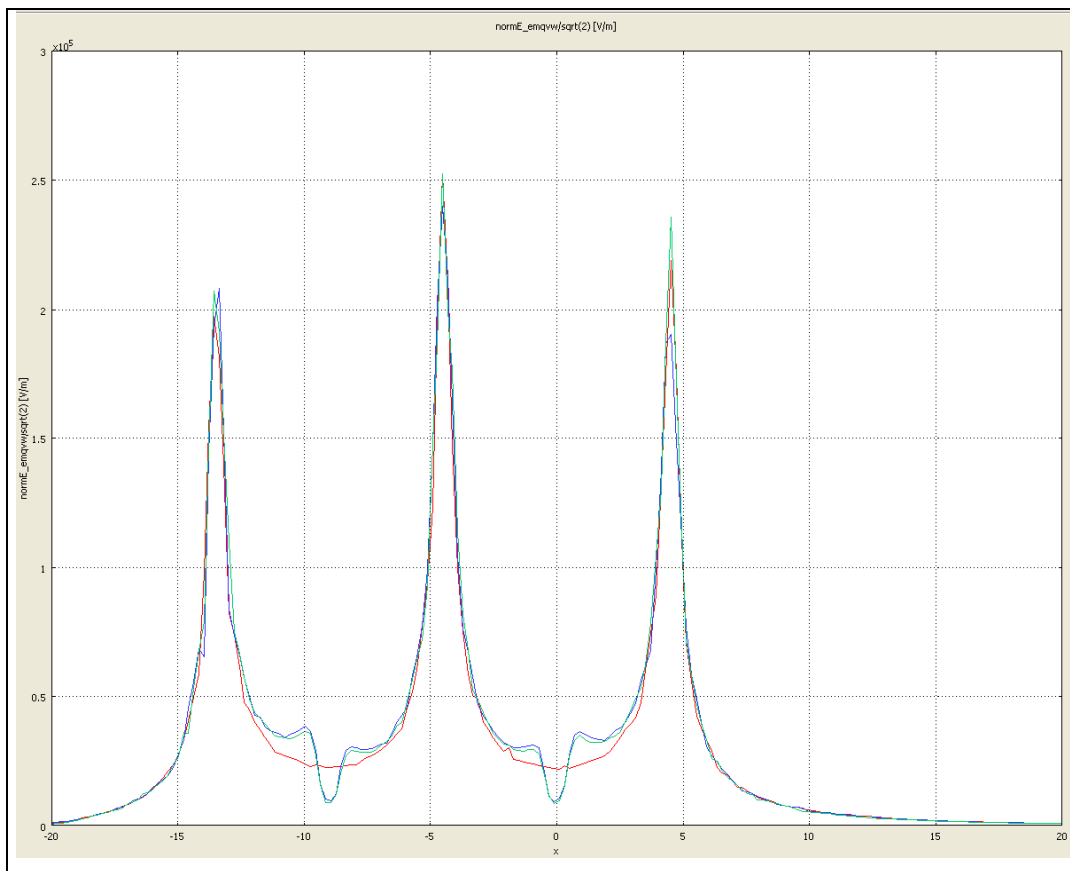
Fältet har beräknats 2D-analytiskt för samtliga nio beräkningsfall och genomgående vid både stolpben och mittspann. Numeriska 3D-beräkningar har gjorts för stolppositionen för 130 kV med 4 meters fasavstånd och för stolppositionen för 400 kV med 9 meters fasavstånd. En jämförande 3D-beräkning visar att de jordade stolpbenen har betydelse för fältet i den normala arbetsmiljön, se figurerna 12, 13, 14 och figur 18 nedan (130_4). Skillnaden är påtaglig närmast stolpbenet, där fältet är mer än dubbelt så högt som utan stolpben, men på 1 meters avstånd från stolpbenet har denna påverkan minskat högst betydligt.



Figur 18. Inverkan av jordade stolpben för 130 kV med 4 meters fasavstånd. Kurvorna visar det totala E-fältet längs en horisontell linje på 13,0 meter ovan mark, dvs 0,25 m under faslinorna. Röd kurva anger fältet med hänsyn endast tagen till faslinorna. Blå kurva visar fältet med hänsyn även till jordade stolpben och grön kurva visar inverkan även av en jordad regel. Observera att grafen visar ett extremfall med jordade och ledande stolpben. På 130 kV dominerar trästolpar som kan ha en högst varierande ledningsförmåga, från torrt trä till stolpar med regnvåt utsida och även med en klamrad jordlina och eventuellt ett nät upp till regeln. Den vertikala skalan omfattar 0 - 70 kV/m, med 10 kV/m och ruta. Den horisontella skalan sträcker sig från -10 till +10 m, med 2 m per ruta. Stolpben vid -2 och +2 m.

Effekten av stolpbenen är lika påtaglig vid 400 kV som Figur 19 visar.

Med stöd av detta anses det ändå möjligt, och med rimliga krav på noggrannhet, kunna beräkna E-fältet analytiskt i ett flertal positioner: Fältet några meter ut i spannet, ex vis i Beräkningsplan B, påverkas inte nämnvärt av stolpbenen. Detsamma gäller fältet på markytan och några meter däröver. Områdena utanför och under ytterfaserna ligger likaledes på gott avstånd från jordade detaljer, möjligen kan staglinor orsaka lokalt ökade fältstyrkor. Området mellan faslina och stolpben är delvis påverkat som Figurerna 18 och 19 visar och området mellan faslinor och regel är påtagligt påverkat.



Figur 19. Inverkan av stolpben och regel för 400 kV med 9 meters fasavstånd. Faslinorna ligger på 21,6 m höjd ovan mark och kurvorna visar fältet längs en horisontell linje 0,25 m under faslinorna. Beräknat vid 410 kV.

Röd kurva: Endast fasledare. Blå kurva: Fasledare och stolpben.

Grön kurva: Fasledare, stolpben och regel.

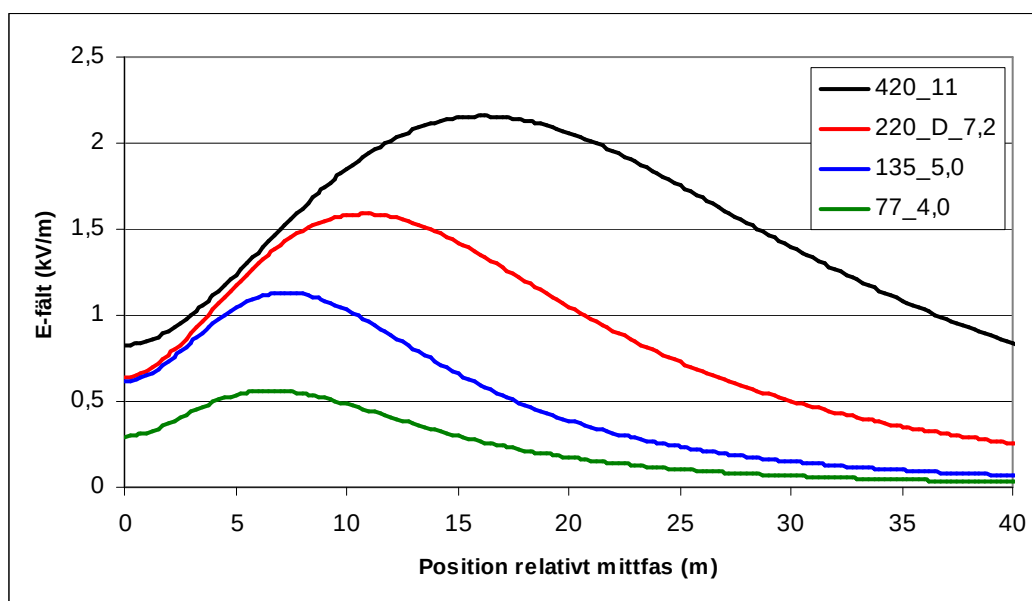
Den vertikala skalan omfattar 0 - 300 kV/m, med 50 kV/m och ruta. Den horisontella sträcker sig från -20 till +20 m, med 5 m per ruta. Stolpbenen är placerade vid -9 m och vid 0 m.

7.1.1 Analytisk beräkning av fältstyrkan på markytan

Fältet på markytan och något däröver påverkas framförallt av spänningsnivån, höjden till faslinorna och fasavståndet. Den effektiva ledardiametern har en viss betydelse – större diameter ger högre fält på något avstånd från linan. Topplinor har liten effekt på fältet vid marknivå.

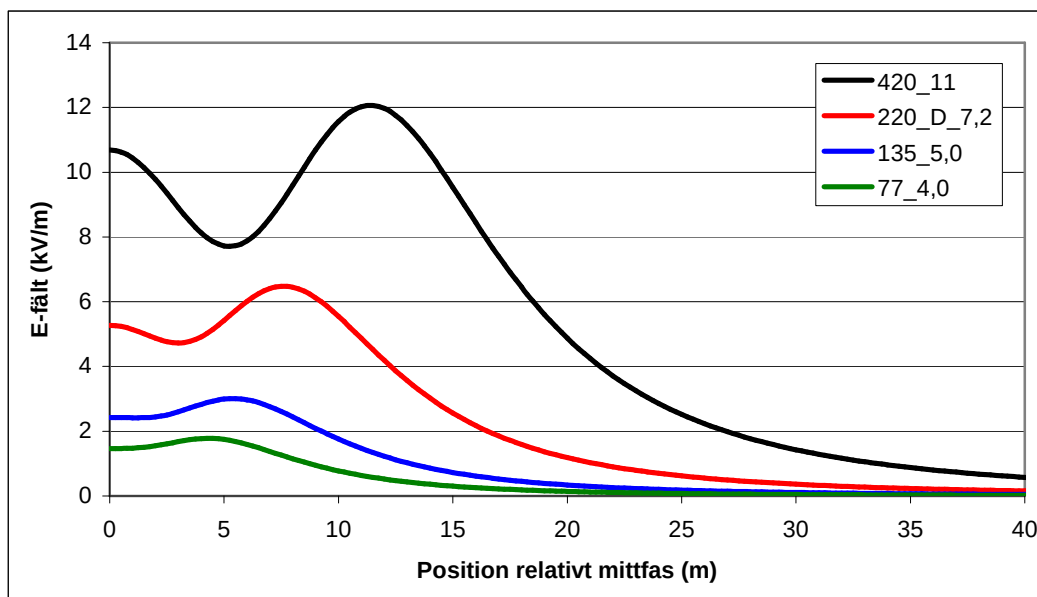
Figurerna 20 och 21 visar fältstyrkan 2 m ovan mark. Fältet är något lägre på 1 meters höjd och skillnaden är mer påtaglig med faslinorna på minimihöjd.

De redovisade beräkningsfallen är de som för respektive spänningsnivå ger den högsta fältstyrkan. För 77 och 130 kV, med Simplex, har det största fasavståndet valts, för 220 kV har Duplex valts och för 400 kV är det den ekvivalenta ledardiametern (Triplex > Duplex) som dominerar över fasavståndet.



Figur 20. Elektriskt totaltfält 2 m ovan mark, i beräkningsplan A (vid stolpen). Faslinornas höjd ovan mark = höjden vid stolpen.

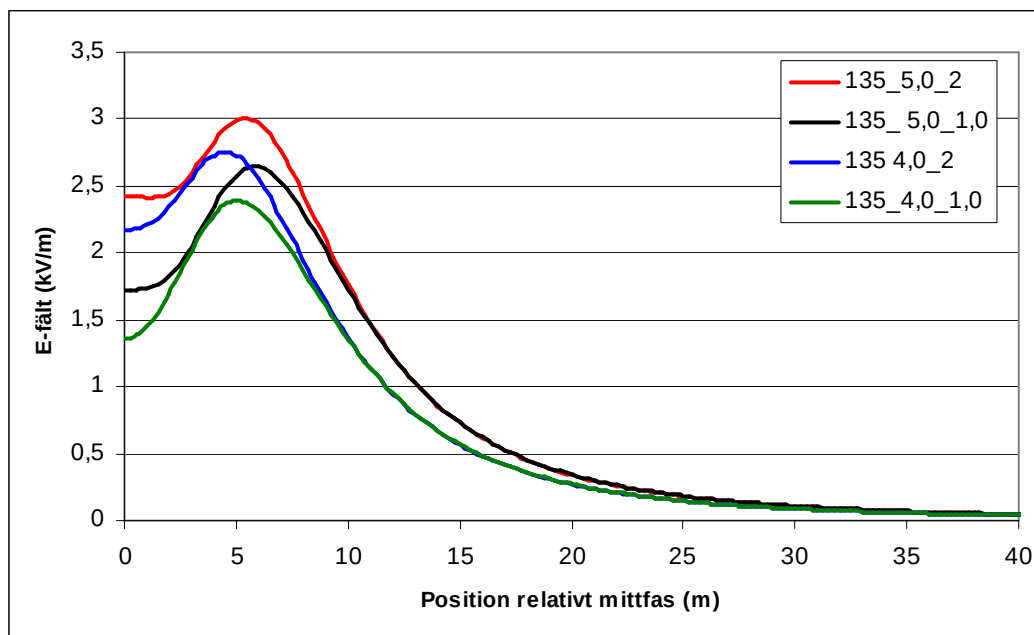
Man kan konstatera att fältet är förhållandevis lågt i stolpens närhet, men ökar när linhöjden minskar mot spannmitt. Värdena i Figur 21 ligger över 5 kV/m för 220 och 400 kV och t o m över 10 kV/m för 400 kV. Man skall dock komma ihåg att antagna minimihöjder är extremfall (6 m för 77 kV, 6,5 m för 130 kV, 7 m för 220 kV och 7,8 m för 400 kV) och avser ett belastningsfall med jämn islast, ingen vind och 0 °C *eller* ojämn islast, 0 °C *eller* högsta ledartemperatur. För fallet 400 kV och 11 meters fasavstånd innebär en höjning av faslinorna från 7,8 till 8,8 m, att den maximala fältstyrkan sjunker från ca 12 till ca 10 kV/m.



Figur 21. Elektriskt totalfält 2 m ovan mark, beräkningsplan B (i mittspann). Faslinorna i lägsta höjd.

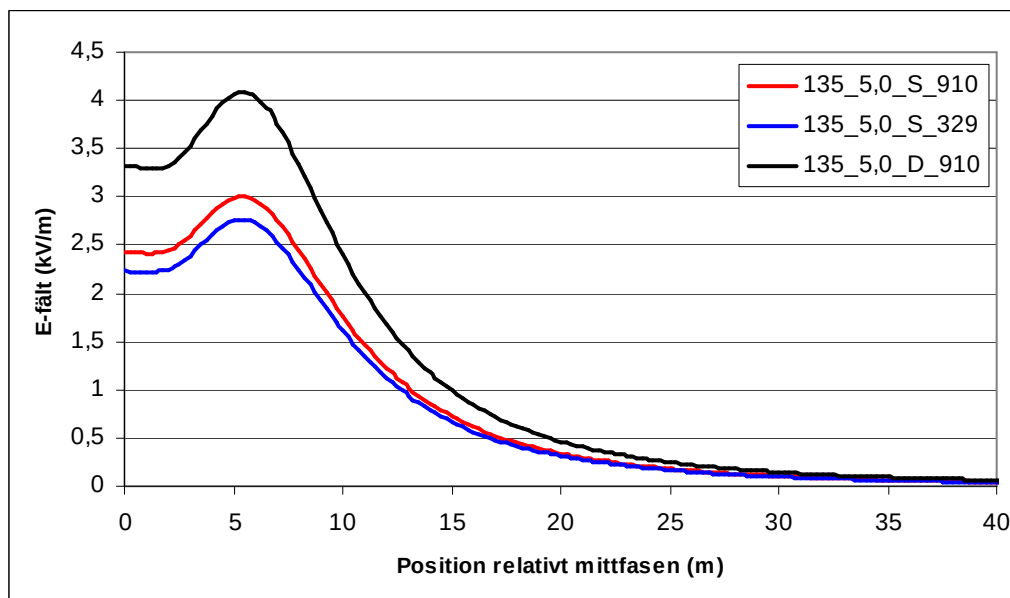
Betydelsen av fasavståndet och mätpunktens eller mätlinjens höjd ovan mark kan illustreras med Figur 22, som visar totalfältet under två 130 kV ledningar med 5 och 4 meters fasavstånd. Höjden till faslinorna är i båda fallen 6,5 m. Det framgår att fasavståndet har en viss betydelse för fältstyrkan, maxvärdet för 5 meters höjd är ca 3,0 kV/m och för 4 meter ca 2,8 kV/m. Mätpunktens höjd ovan mark har i detta fall en större betydelse.

Betydelsen av ledardiametern är måttlig. En större ledardiameter ger ett lägre fält på ledarytan och det måste kompenseras med ett högre fält i området närmare jord. Figur 23 visar totalfältet under tre 130 kV ledningar med olika fasledare; Simplex 329 mm², Simplex 910 mm² och Duplex 910 mm². Skillnaden i diameter mellan Simplex 910 mm² och Simplex 329 mm² är en faktor 1,66 och mellan Duplex 910 mm² och Simplex 329 mm² en faktor 7,97 (Den ekvivalenta ledardiametern för en Duplex 910 mm² med c-c 450 mm är 188 mm och för motsvarande Triplex är den 317 mm.)

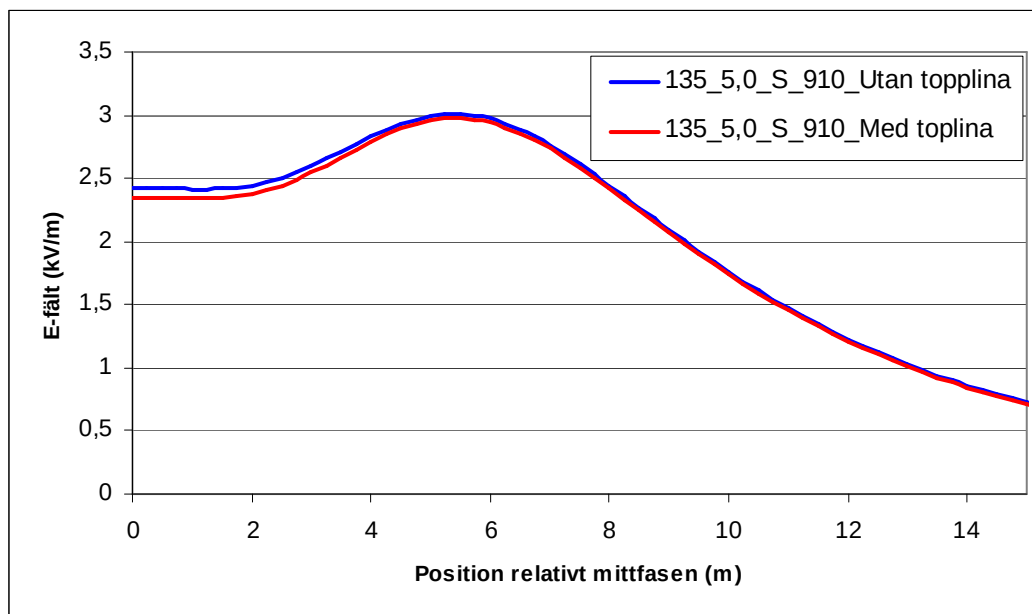


Figur 22. Elektriskt totalfält under två 130 kV ledningar med 5 respektive 4 meters fasavstånd. Fältet anges för 1 och 2 m ovan mark. Beräkningsplan B (mittspann).

Eventuella topplinor har en mycket ringa inverkan på fältstyrkan på marknivå, vilket visas av Figur 24. I exemplet har ledningen försetts med två topplinor 329 mm² med c-c 5,0 m och på 10 m ovan mark. Faslinorna ligger på 6,5 m. Skillnaden vid 0 m uppgår till ca 3 %.



Figur 23. Elektriskt totalfält under 130 kV ledningar med tre olika ledar-dimensioner; Simplex 329 mm², Simplex 910 mm² och Duplex 910 mm². Fältet anges för 2 m ovan mark. Beräkningsplan B (mittspann).



Figur 24. Elektriskt totalfält under två 130 kV ledningar med och utan toplina. Fältet anges för 2 m ovan mark. Beräkningsplan B (mittspann).

Ovanstående visar att en konservativ beräkning av den elektriska fältstyrkan på marknivå kan baseras på största förekommande fasavstånd och största ledardiameter. Skillnaden mellan 1 och 2 meters beräkningshöjd är måttlig. Däremot är faslinornas höjd en mer kritisk faktor och en orealistisk låg höjd leder till onödigt höga fältstyrkor.

Under ledningar för 70 och 130 kV fås fältstyrkor väl understigande 5 kV/m, även där linorna hänger på lägsta höjd. Under en 220 kV ledning kan fältstyrkan lokalt överstiga 6 kV/m när faslinorna hänger i lägsta höjd 7 m ovan mark. Fältet under 400 kV ledningar ligger över 5 kV/m under ett större område ute i spannet. Lokalt överstiger fältet 10 kV/m och kan under mer extrema förutsättningar nå upp till ca 12 kV/m. Området med en fältstyrka >10 kV/m är något bredare än dubbla fasavståndet.

7.1.2 Analytisk beräkning av fältstyrkan i fasledarnas närhet

För de som arbetar med underhåll av ledningsnätet, och i synnerhet om arbetet bedrivs som ett arbete med spänning, är den elektriska fältstyrkan i ledarnas närhet av stor betydelse. I tabellerna 5 – 13 anges avståndet från ledarcentrum till den punkt där fältstyrkan underskrider ett viss värde. Med ledarcentrum avses för Duplex en punkt mitt emellan de två fasledarna och för Triplex avses "tyngdpunkten" för de tre ledarna. Tabellerna baseras på analytiska beräkningar av fältstyrkan längs ett antal linjer. Se Figur 25. För beräkningssnitt A, vid stolpen, finns två vertikala (A1, A3) och tre horisontella linjer (A4-A6). För snitt B, vid mittspann, finns tre vertikala (B1-B3) och tre horisontella linjer (B4-B6).

För jämförelse med olika arbetspositioner anges i tabellerna även aktuella avstånd till riskområdets yttre gräns och till närområdets yttre gräns. Dessa avstånd har hämtats från tabell 4.

A1: Vertikal linje under mittfasen. 0 vid faslinan.

A3: Vertikal linje under en ytterfas. 0 vid faslinan.

A4: Horisontell linje från mittfas och mot ytterfas. 0 vid mittfasen.

A5: Horisontell linje från ytterfas och mot mittfas. 0 vid ytterfasen.

A6: Horisontell linje från ytterfas och ut från ledningen. 0 vid ytterfasen.

B1: Vertikal linje under mittfasen. 0 vid faslinan.

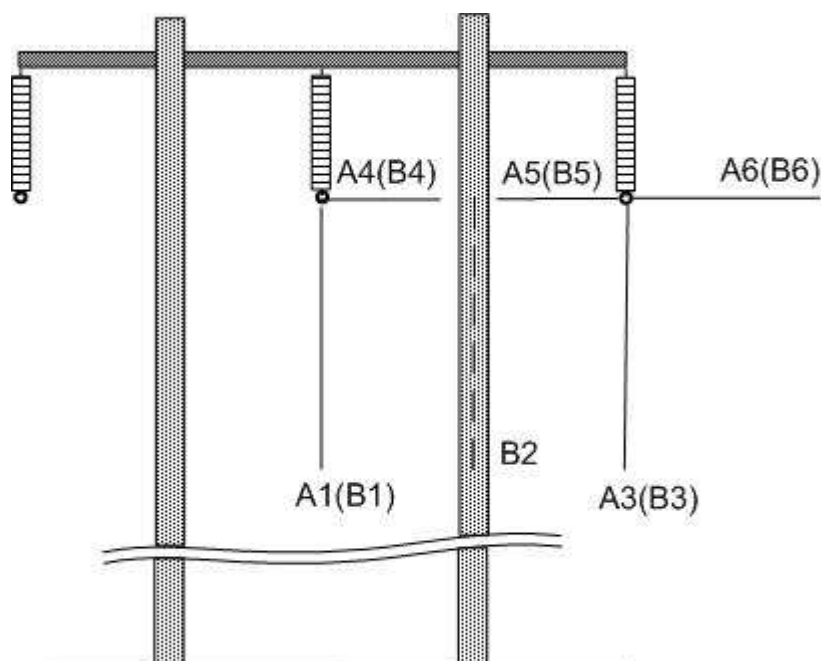
B2: Vertikal linje mitt emellan mittfas och ytterfas. 0 i nivå med faslinorna.

B3: Vertikal linje under en ytterfas. 0 vid faslinan.

B4: Horisontell linje från mittfas och mot ytterfas. 0 vid mittfasen.

B5: Horisontell linje från ytterfas och mot mittfas. 0 vid ytterfasen.

B6: Horisontell linje från ytterfas och ut från ledningen. 0 vid ytterfasen.



Figur 25. Beräkningslinjer i snitt A (vid stolpen) . Snitt B (vid mittspann) inom parentes.

Linjerna A1 och A3 är i någon mån påverkade av stolpbenet, men denna inverkan är så liten att man i detta sammanhang kan bortse från den. Däremot när det gäller linjerna A4 och A5 är denna påverkan betydligt mer markant och den analytiska beräkningen är rimligt tillförlitlig fram till en punkt ungefär mitt emellan faslina och stolpben. För var ledning anges för jämförelse avståndet till riskområdets yttre gräns och avståndet till närområdets yttre gräns. Värden inom parentes är något osäkra p g a närhet till stolpben.

Fältstyrkan i ledarnas omedelbara närhet når betydligt högre värden än vad som framgår av tabellerna nedan. Fasledarnas diameter dimensioneras med hänsyn till förväntad belastning och spänningsnivå. För att få en acceptabel fältstyrka på ledarytan används ofta knippen av två eller flera ledare vid högre spänningar. Den maximala fältstyrkan på ledarytan brukar vanligen ligga på 10 – 20 kV/cm (1 000-2 000 kV/m).

Fältbilden för Duplex och Triplexkonfigurationer uppvisar ett område mellan ledarna med lägre fältstyrka, men gradienten är hög och en liten förflyttning i sidled medför snabbt betydligt högre fältstyrkor. Vid arbete med barhandsmetoden förekommer det att montörer placerar bålen eller huvudet mellan ledarna, men sådant arbete kan medföra att kroppen utsätts för mycket höga fält. En arbetsdräkt av ledande tyg begränsar i och för sig det elektriska fältet, men arbetssättet kräver ändå stor försiktighet.

Luftledning: 70 kV, fasavstånd 4,0 m Avstånd till riskområdet yttre gräns: 0,75 m Avstånd till närområdets yttre gräns: 1,75m											
E-fält (kV/m)	Avstånd i meter till den punkt där E-fältet underskrider angivet värde										
	Beräkningslinje										
	A1	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4	B5	B6
<45	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	<10 kV/m	0,20	0,20	0,20	0,20
<20	0,45	0,40	0,45	0,45	0,40	0,40		0,45	0,45	0,45	0,40
<10	0,85	0,80	0,95	0,95	0,70	0,80		0,85	0,95	0,95	0,70
<5	1,65	1,50	-	-	1,30	1,55	1,30	1,65	-	-	1,35

Tabell 5. E-fält längs linjer, 70 kV, 4 m fasavstånd. Data enligt avsnitt 5.1.

I Tabell 5, linjerna A4, A5, B4 och B5 anges inga avstånd för < 5 kV/m p g a att fältstyrkan inte i någon punkt underskrider 5 kV/m. Detsamma gäller Tabell 6. Generellt gäller för 70 kV att fältstyrkan är < 20 kV/m utanför riskområdet och < 5 kV/m utanför närområdet, även om några punkter ligger på alldeles på gränsen 5 kV/m. Lokala högre fältstyrkor kan dock förekomma nära stolpben och reglar, vilket visas närmare i avsnitt 7.1.3.

Luftledning: 70 kV, fasavstånd 3,0 m Avstånd till riskområdet yttre gräns: 0,75 m Avstånd till närområdets yttre gräns: 1,75 m											
	Avstånd i meter till den punkt där E-fältet underskrider angivet värde										
	Beräkningslinje										
E-fält (kV/m)	A1	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4	B5	B6
<45	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	<10 kV/m	0,20	0,20	0,20	0,20
<20	0,45	0,40	0,50	0,50	0,40	0,45		0,45	0,50	0,50	0,40
<10	0,90	0,80	1,25	1,30	0,70	0,80		0,90	1,25	1,30	0,70
<5	1,70	1,50	-	-	1,25	1,55	1,60	1,70	-	-	1,30

Tabell 6. E-fält längs linjer, 70 kV, 3 m fasavstånd. Data enligt avsnitt 5.2.

Luftledning: 130 kV, fasavstånd 5,0 m Avstånd till riskområdet yttre gräns: 1,1 m Avstånd till närområdets yttre gräns: 3,0 m											
	Avstånd i meter till den punkt där E-fältet underskrider angivet värde										
	Beräkningslinje										
E-fält (kV/m)	A1	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4	B5	B6
<45	0,35	0,35	0,35	0,35	0,30	0,35	<10 kV/m	0,35	0,35	0,35	0,30
<20	0,75	0,70	0,80	0,80	0,65	0,75		0,70	0,80	0,80	0,65
<10	1,45	1,35	(2,05)	(2,10)	1,20	1,45		1,40	1,95	2,05	1,20
<5	2,80	2,55	-	-	2,15	2,70	2,55	2,70	-	-	2,25

Tabell 7. E-fält längs linjer, 130 kV, 5 m fasavstånd. Data enligt avsnitt 5.3.

Precis som i tidigare tabellpar saknas vissa avstånd för lägre fältstyrkor p g a att fältstyrkan inte underskrider dessa nivåer. Generellt gäller för 130 kV att fältstyrkan är < 20 kV/m utanför riskområdet och < 5 kV/m utanför närområdet. Lokala högre fältstyrkor kan dock förekomma nära stolpben och reglar, vilket visas närmare i avsnitt 7.1.3.

Luftledning: 130 kV, fasavstånd 4,0 m Avstånd till riskområdet yttre gräns: 1,1 m Avstånd till närområdets yttre gräns: 3,0 m											
	Avstånd i meter till den punkt där E-fältet underskrider angivet värde										
	Beräkningslinje										
E-fält (kV/m)	A1	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4	B5	B6
<45	0,35	0,35	0,35	0,35	0,30	0,35	<20 kV/m	0,35	0,35	0,35	0,30
<20	0,80	0,70	0,85	0,85	0,65	0,75		0,75	0,85	0,85	0,65
<10	1,50	1,35	-	-	1,15	1,50	1,05	1,40	-	-	1,20
<5	2,85	2,55	-	-	2,10	2,70	2,65	2,65	-	-	2,20

Tabell 8. E-fält längs linjer, 130 kV, 4 m fasavstånd. Data enligt avsnitt 5.4.

Luftledning: 220 kV, fasavstånd 7,20 m. Simplex. Avstånd till riskområdet yttre gräns: 1,6 m Avstånd till närområdets yttre gräns: 3,0 m											
	Avstånd i meter till den punkt där E-fältet underskrider angivet värde										
	Beräkningslinje										
E-fält (kV/m)	A1	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4	B5	B6
<45	0,50	0,50	0,50	0,5	0,45	0,50	<10 kV/m	0,50	0,50	0,50	0,50
<20	1,10	1,05	1,20	1,20	0,95	1,15		1,10	1,20	1,20	1,00
<10	2,20	2,05	-	-	1,80	2,25		2,25	3,15	3,30	1,90
<5	4,15	3,85	-	-	3,25	4,15	3,70	4,75	-	-	3,45

Tabell 9. E-fält längs linjer, 220 kV, 7,2 m fasavstånd. Simplex. Data enligt avsnitt 5.5.

Precis som för 70 och 130 kV saknas vissa avstånd för lägre fältstyrkor p g a att fältstyrkan inte underskrider dessa nivåer. Generellt gäller för 220 kV att fältstyrkan är < 20 kV/m utanför riskområdet. Lokala högre fältstyrkor kan dock förekomma nära stolpben och reglar, vilket visas närmare i avsnitt 7.1.3. Gränsen för närområdet – 3,0 m – medför i allmänhet fält < 10 kV/m. Undantaget är positioner mellan faslinorna (Linje A/B 4 och A/B 5). Skillnaden mellan Simplex och Duplex är påtaglig, den senare ger högre fältstyrkor på ett visst avstånd.

Luftledning: 220 kV, fasavstånd 7,2 m. Duplex. Avstånd till riskområdet yttre gräns: 1,6 m Avstånd till närområdets yttre gräns: 3,0 m											
	Avstånd i meter till den punkt där E-fältet underskrider angivet värde										
	Beräkningslinje										
E-fält (kV/m)	A1	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4	B5	B6
<45	0,60	0,55	0,80	0,80	0,70	0,65	<20 kV/m	0,60	0,80	0,80	0,70
<20	1,50	1,35	1,75	1,85	1,30	1,50		1,45	1,75	1,80	1,35
<10	2,90	2,65	-	-	2,30	2,95	2,15	3,00	-	-	2,50
<5	5,20	4,95	-	-	4,10	5,25	4,80	-	-	-	4,20

Tabell 10. E-fält längs linjer, 220 kV, 7,2 m fasavstånd. Duplex. Data enligt avsnitt 5.6.

Luftledning: 400 kV, fasavstånd 12,0 m Avstånd till riskområdet yttre gräns: 2,7 m Avstånd till närområdets yttre gräns: 5,1 m											
	Avstånd i meter till den punkt där E-fältet underskrider angivet värde										
	Beräkningslinje										
E-fält (kV/m)	A1	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4	B5	B6
<45	1,10	1,05	1,25	1,20	1,10	1,20	<20 kV/m	1,15	1,25	1,25	1,15
<20	2,55	2,35	2,90	3,00	2,20	2,80		2,80	2,85	2,95	2,20
<10	4,95	4,60	-	-	4,00	6,25	3,20	-	-	-	4,40
<5	8,85	8,50	-	-	7,05	-	-	-	-	-	7,55

Tabell 11. E-fält längs linjer, 400 kV, 12,0 m fasavstånd. Duplex. Data enligt avsnitt 5.7.

Precis som i tidigare tabellpar saknas vissa avstånd för lägre fältstyrkor p g a att fältstyrkan inte underskrider dessa nivåer. Generellt gäller för 400 kV att fältstyrkan är < 45 kV/m utanför riskområdet och < 20 kV/m utanför närområdet. Fältstyrkan mellan faslinorna är generellt hög. Lokala högre fältstyrkor kan förekomma nära stolpben och reglar, vilket visas närmare i avsnitt 7.1.3.

Luftledning: 400 kV, fasavstånd 11,0 m Avstånd till riskområdet yttre gräns: 2,7 m Avstånd till närområdets yttre gräns: 5,1 m											
	Avstånd i meter till den punkt där E-fältet underskrider angivet värde										
	Beräkningslinje										
E-fält (kV/m)	A1	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4	B5	B6
<45	1,10	0,95	1,35	1,30	1,10	1,15	<20 kV/m	1,10	1,35	1,35	1,20
<20	2,65	2,40	3,65	3,75	2,35	2,85		2,90	3,50	3,60	2,60
<10	5,30	4,85	-	-	4,30	6,30	4,30	-	-	-	4,80
<5	9,25	8,95	-	-	7,60	-	-	-	-	-	8,30

Tabell 12. E-fält längs linjer, 400 kV, 11,0 m fasavstånd. Triplex. Data enligt avsnitt 5.8.

Luftledning: 400 kV, fasavstånd 9,0 m Avstånd till riskområdet yttre gräns: 2,7 m Avstånd till närområdets yttre gräns: 5,1 m											
	Avstånd i meter till den punkt där E-fältet underskrider angivet värde										
	Beräkningslinje										
E-fält (kV/m)	A1	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4	B5	B6
<45	1,15	1,00	1,45	1,40	1,10	1,20	-	1,10	1,45	1,45	1,20
<20	2,80	2,50	-	-	2,35	2,85	1,55	2,90	-	-	2,60
<10	5,45	4,85	-	-	4,25	5,60	5,00	-	-	-	4,75
<5	9,30	8,65	-	-	7,35	-	-	-	-	-	8,05

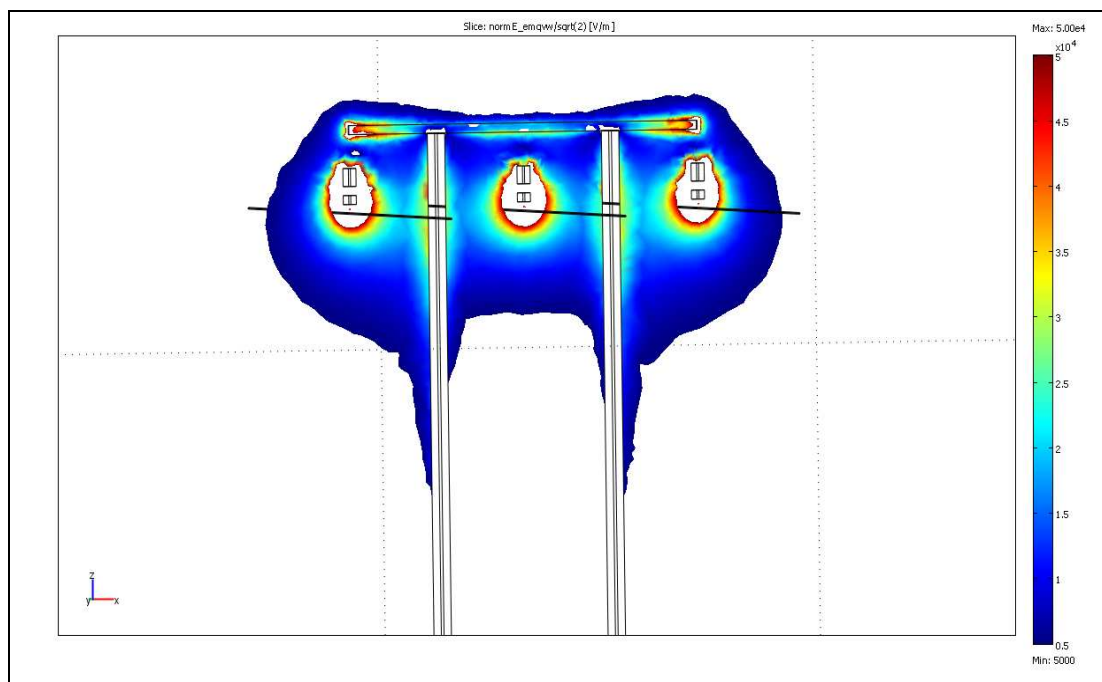
Tabell 13. E-fält längs linjer, 400 kV, 9,0 m fasavstånd. Triplex. Data enligt avsnitt 5.9.

7.1.3 Numerisk beräkning av fältstyrkan nära stolpen och reglar

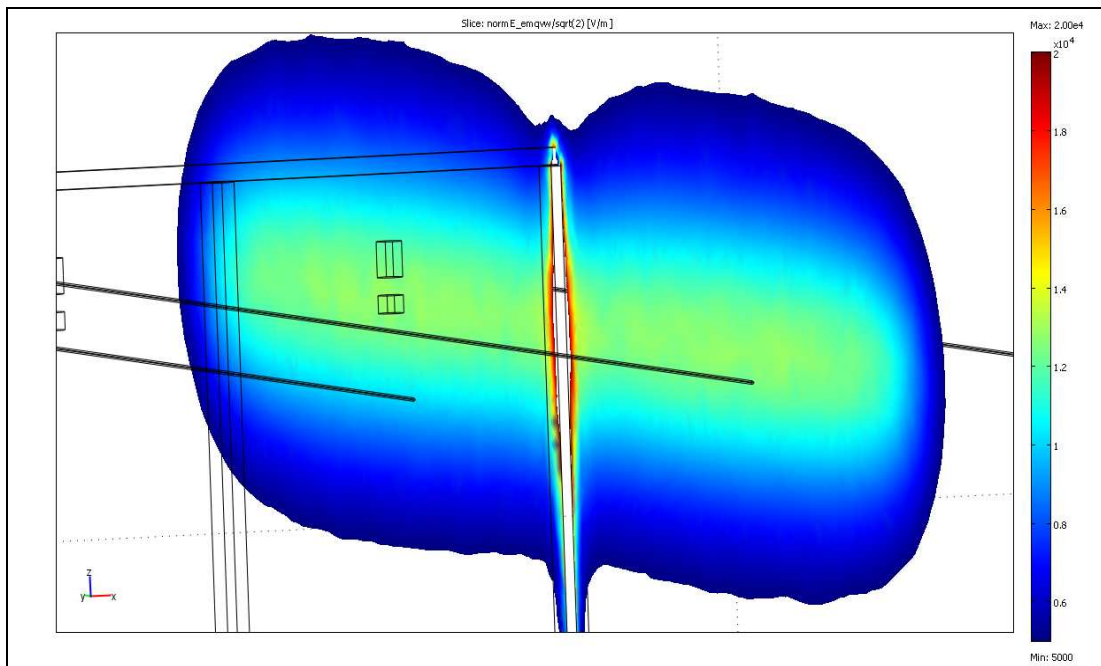
Fältstyrkan nära stolpben, reglar, staglinor mm kan beräknas med 3-dimensionella numeriska metoder. För att begränsa dessa tidsödande beräkningar måste dock modellerna förenklas betydligt, en möjlighet är att studera några "värsta fall" för några typiska spänningsnivåer. I figur 18 och 19 visades inverkan av stolpben och regel på fältstyrkan i området invid stolpbenen. Figur 18, 130 kV, är beräknad med ledande stolpben, vilket är ett extremfall. Trästolpar är vanliga och dessa brukar vara mer eller mindre isolerande beroende på fukthalten. Riktigt fuktiga trästolpar med påspikad jordlina upp till regeln kan möjligen ge upphov till förutsättningar som motsvarar figur 12. Figur 19, för 400 kV, är beräknad med en förenklad stål stolpe av gittertyp, vilket stämmer bättre med vanliga förhållanden.

Nedan visas en serie bilder och grafer för 130 och 400 kV. De har beräknats med ledande stolpben enligt ovan och med den nedre delen av isolatorkedjan med full spänning. I verkligheten sjunker fältstyrkan uppåt och når ett minimumvärde ungefär mitt på kedjan, för att sedan åter stiga något närmast jordsidan vid kedjans övre del. Denna förenkling ger ett större område med full spänning och därmed ett något bredare område med förhöjt fält än om isolatorkedjan hade getts graderad potential.

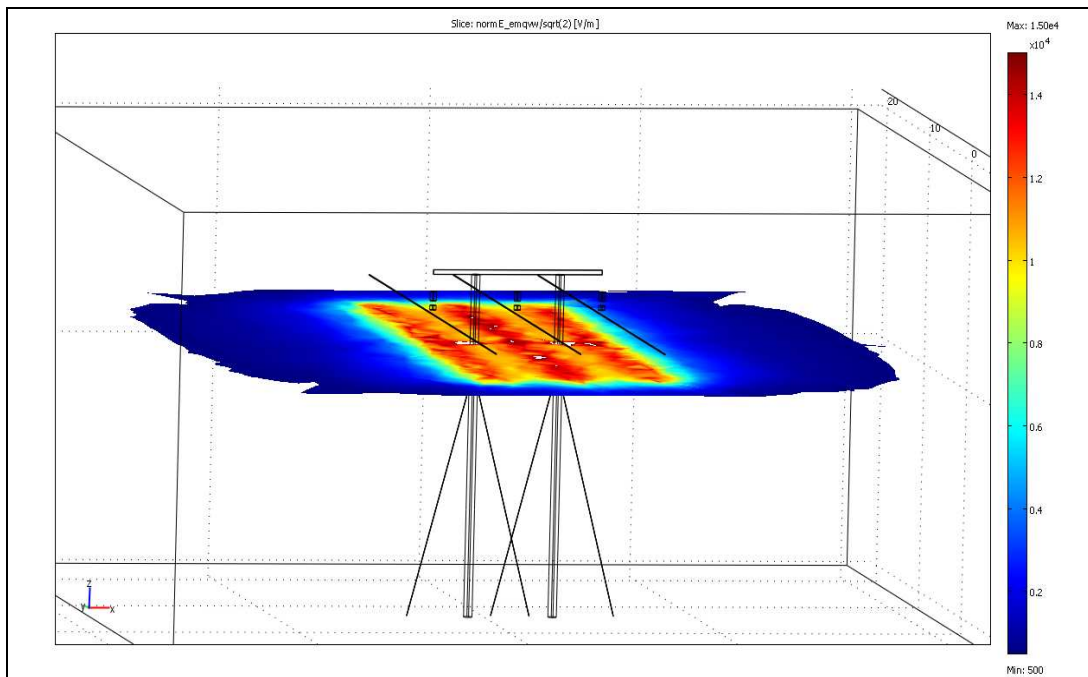
För den beräknade 130 kV stolpen fås högst fältstyrka i området mellan stolpbenet och ytterfaserna, se figurerna 26 - 29. Detta område är särskilt intressant för underhållsarbete, då stolpbenet erbjuder en naturlig arbetsplattform. Vid klättring längs stolpbenet fås det högsta fältet i nivå med faslinorna, där det uppgår till ca 20 kV/m, se figur 29. Ett par meter under faslinorna är fältet ca 10 kV/m. Dessa beräkningar har verifierats genom mätning, se avsnitt 8.



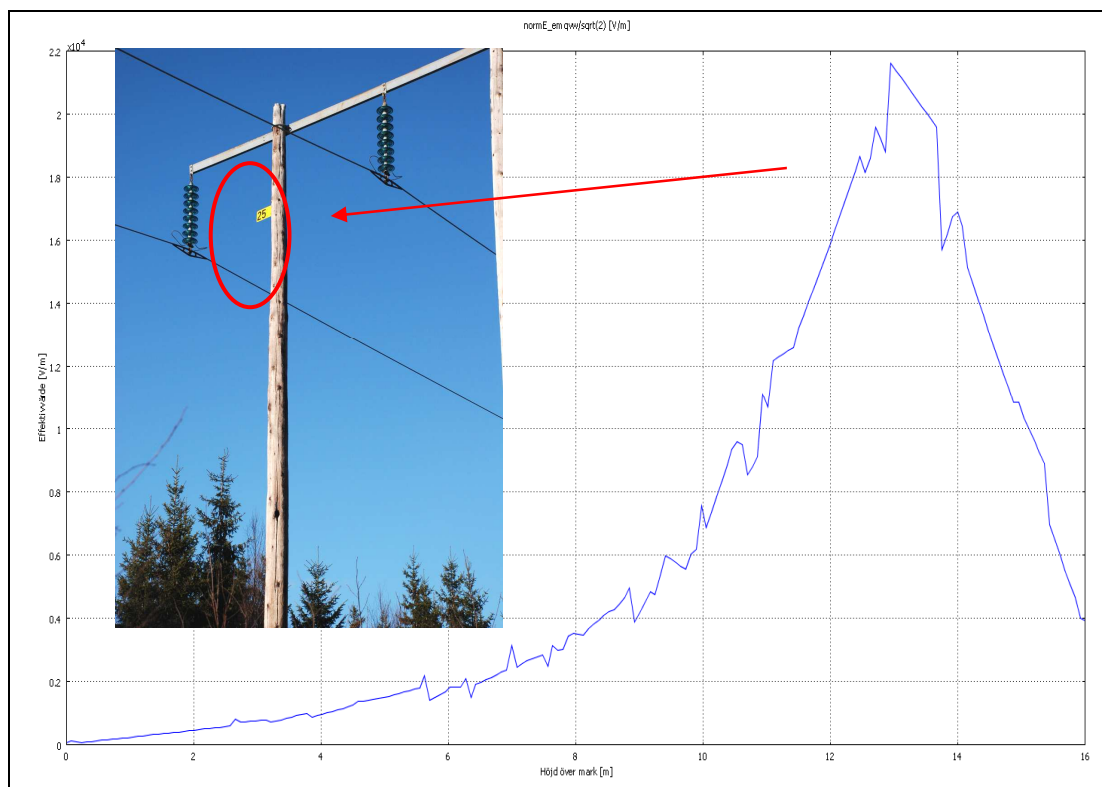
Figur 26. 130 kV med 4 m fasavstånd. Vertikalt snitt. Skalans minvärde är 5 kV/m och dess maxvärde är 50 kV/m. Vit färg anger fält utanför dessa nivåer.



Figur 27. 130 kV med 4 m fasavstånd. Vertikalt snitt längs med ledningen. Observera området med förhöjt fält invid stolpbenet (den vita randen). Skalans minvärde är 5 kV/m och dess maxvärde är 20 kV/m. Vit färg anger fält utanför dessa nivåer.



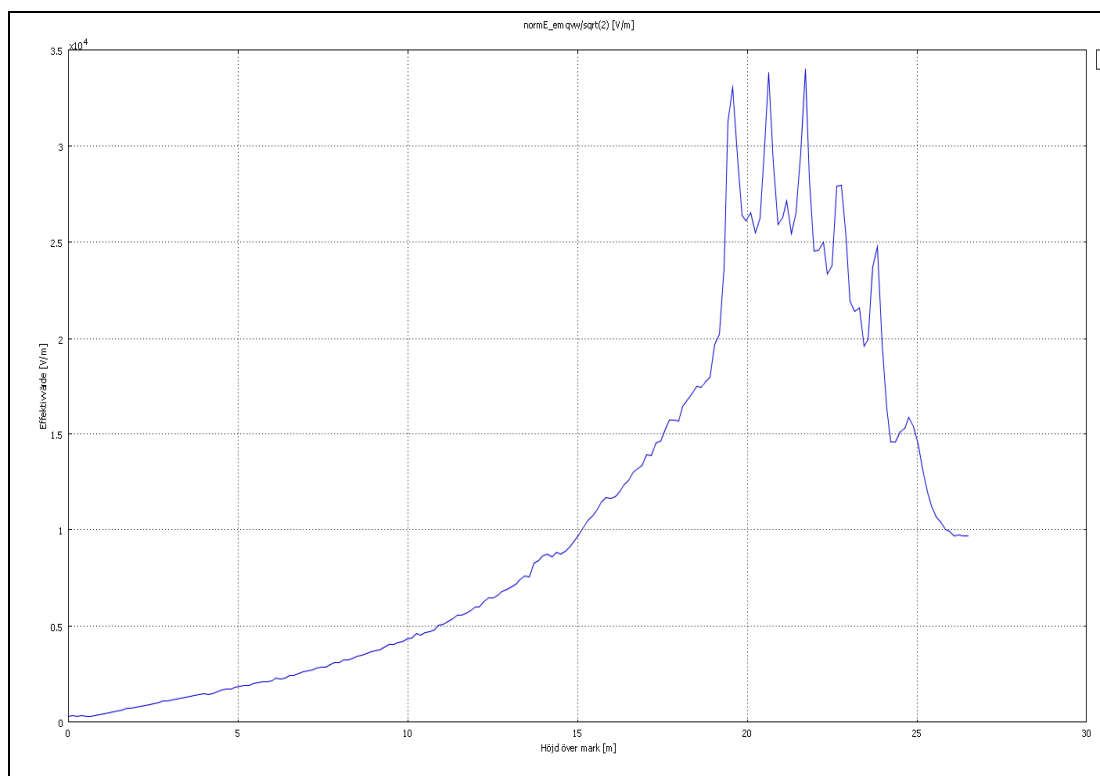
Figur 28. 130 kV med 4 m fasavstånd. Horisontellt snitt 12 m ovan mark, motsvarande 1,25 m under faslinorna. Skalans minvärde är 1 kV/m och dess maxvärde är 15 kV/m. Vit färg anger fält utanför dessa nivåer.



Figur 29. 130 kV med 4 m fasavstånd. Fältstyrkan längs en linje 0,2 m från stolpbenet, i linjeriktningen, från mark och upp till och förbi faslinorna. Maxvärdet i höjd med faslinorna är drygt 20 kV/m. Ett par meter under faslinorna fås ca 10 kV/m. Se även Figur 42.

Den vertikala skalan omfattar 0 till 22 kV/m, med 2 kV/m och ruta. Den horisontella skalan sträcker sig från 0 m till 16 m, med 2 m per ruta.

För motsvarande "klätterposition" för den beräknade 400 kV stolpen uppgår den maximala fältstyrkan till ca 30 kV/m. Den betydligt högre spänningen kompenseras av längre avstånd. Se Figur 30.



Figur 30. 400 kV med 9 m fasavstånd. Fältstyrkan längs en vertikal linje 0,2 m från stolpen. Linjen ligger på stolpbenets utsida, mot ytterfasen. Faslinorna hänger på 21,6 m. Regeln börjar på 25,4 m höjd. De högsta topparna uppgår till närmare 35 kV/m. Kurvans markanta pika orsakas av stagen i stolpbenet som ger upphov till lokala fältförstärkningar. Beräknat vid 410 kV.

Den vertikala skalan omfattar 0 till 35 kV/m, med 5 kV/m och ruta. Den horisontella skalan sträcker sig från 0 m till 30 m, med 5 m per ruta.

7.2 Magnetisk flödestäthet

Precis som för det elektriska fältet har den magnetiska flödestätheten beräknats 2D-analytiskt för samtliga nio beräkningsfall och genomgående vid både stolpben och mittspann. Numeriska 3D-beräkningar har gjorts för stolppositionen för 130 kV med 4 meters fasavstånd och för stolppositionen för 400 kV med 9 meters fasavstånd. En jämförande 3D-beräkning visar att detaljer av magnetiskt material (stål, $\mu_r = 4000$) har betydelse för fältet i den normala arbetsmiljön. Se vidare Figur 35-38.

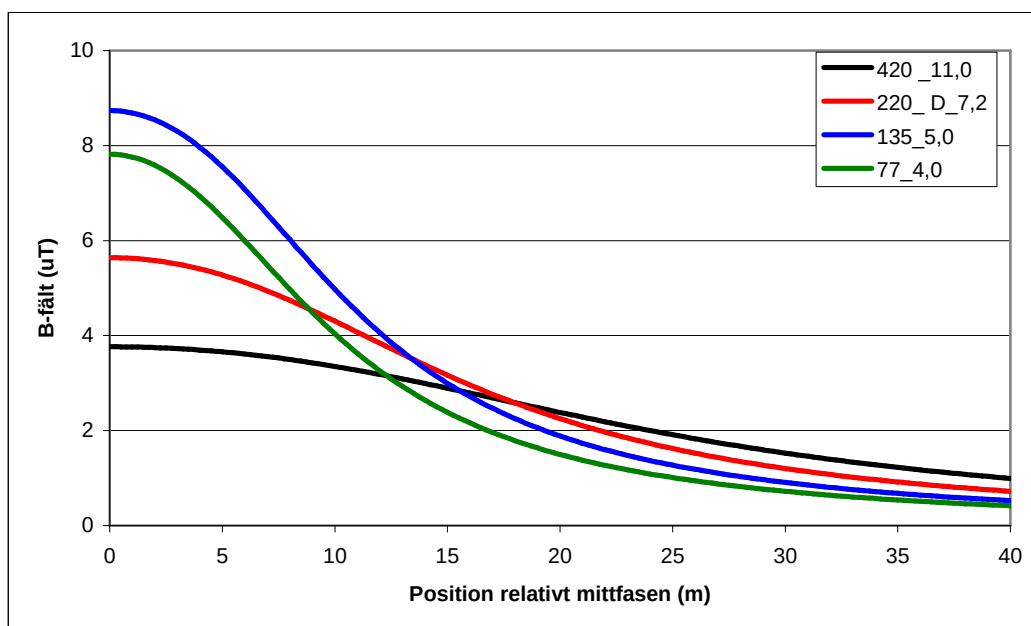
Detta visar, som för E-fältet, att det är möjligt, och med rimliga krav på noggrannhet, kunna beräkna B-fältet analytiskt i ett flertal positioner: Fältet några meter ut i spannet, ex vis i Beräkningsplan B, påverkas inte nämnvärt av stolpbenen. Detsamma gäller fältet på markytan och några meter däröver. Områdena utanför och under ytterfaserna ligger likaledes på gott avstånd från jordade detaljer, möjligen kan staglinor orsaka lokalt ökade fältstyrkor. Området mellan faslina och stolpben är delvis påverkat och området mellan faslinor och regel är påtagligt påverkat.

7.2.1 Magnetisk flödestäthet på markytan

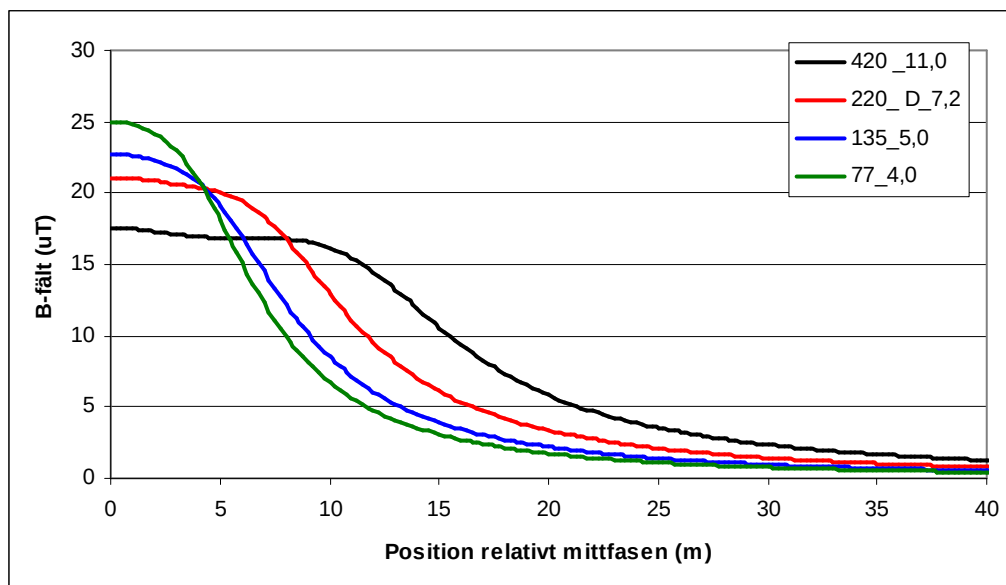
Fältet på markytan och något däröver påverkas av strömstyrkan, höjden till faslinorna och fasavståndet. Figurerna 31 och 32 visar fältstyrkan 2 m ovan mark. Fältet är något lägre på 1 meters höjd och skillnaden är mer påtaglig med faslinorna på minimihöjd.

I de redovisade beräkningsfallen är strömstyrkan densamma (500 A) och resultatet påverkas endast av linhöjd och fasavstånd.

Man kan konstatera att fältet är förhållandevis lågt i stolpens närhet, men ökar när linhöjden minskar mot spannmitt. Alla värden ligger långt under aktuella insats/referensvärden på 100 μT för allmänheten och 500 μT för arbetstagare.

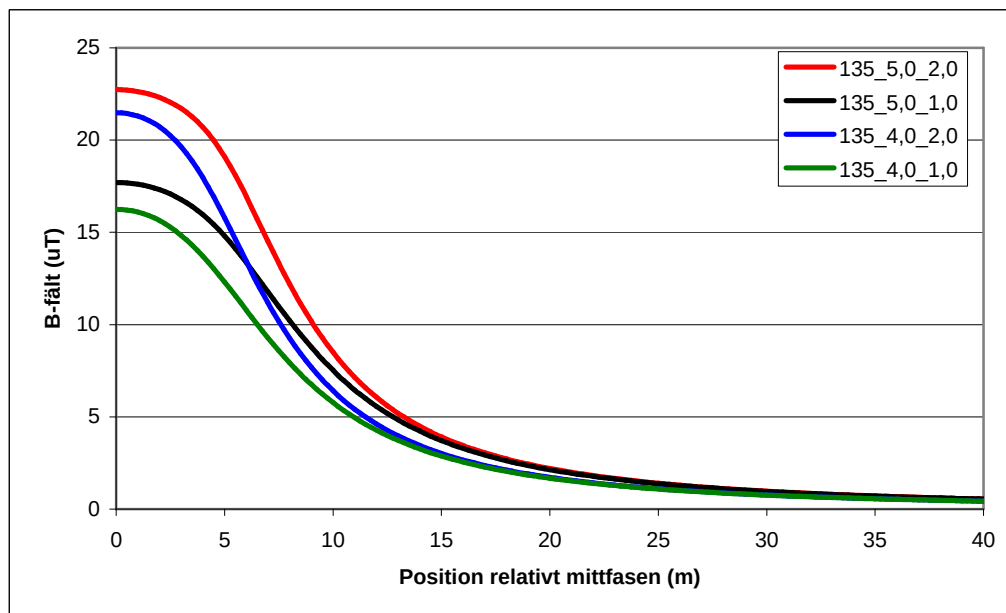


Figur 31. Magnetisk flödestäthet (totalfält) 2 m ovan mark, i beräkningsplan A (vid stolpen). Faslinornas höjd ovan mark = höjden vid stolpen. $I = 500 \text{ A}$.



Figur 32. Magnetisk flödestäthet (totalfält) 2 m ovan mark, i beräkningsplan B (mittspänn). Faslinornas i lägsta höjd. $I = 500$ A.

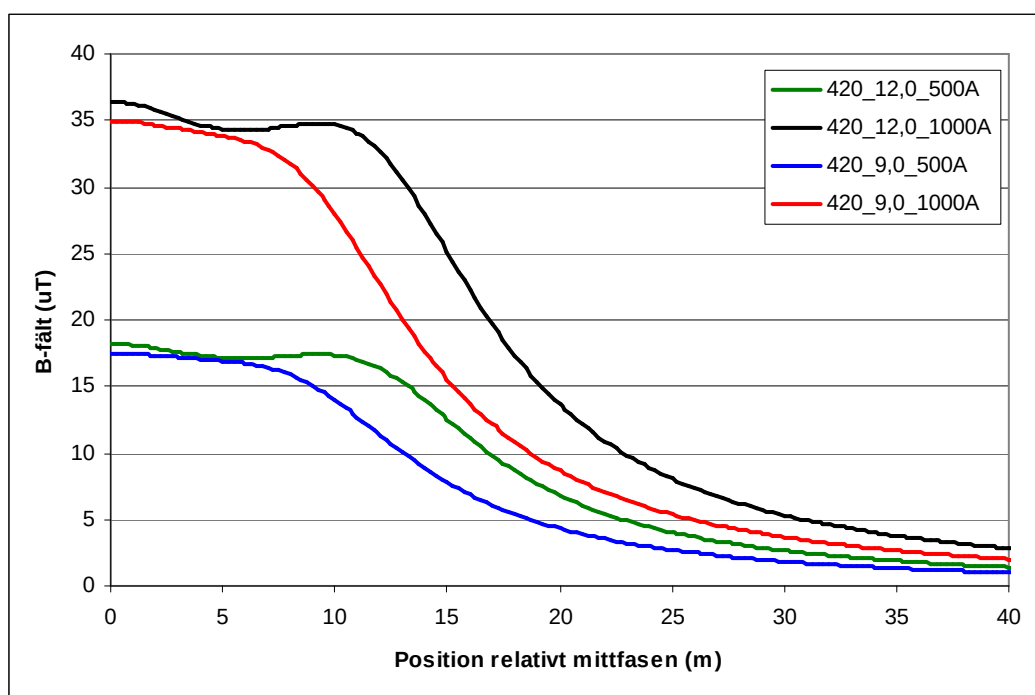
Betydelsen av fasavståndet och mätpunktens eller mätlinjens höjd ovan mark kan illustreras med figur 33, som visar totalfältet under två 130 kV ledningar med 5 och 4 meters fasavstånd. Höjden till faslinorna är i båda fallen 6,5 m. Det framgår att fasavståndet har en viss betydelse för fältstyrkan, maxvärdet för 5 meters höjd är ca $23 \mu\text{T}$ och för 4 meter ca $21 \mu\text{T}$. Mätpunktens höjd ovan mark har i detta fall en större betydelse.



Figur 33. Magnetisk flödestäthet (totalfält) under två 130 kV ledningar med 5 respektive 4 meters fasavstånd. Fältet anges för 1 och 2 m ovan mark. $I = 500$ A. Beräkningsplan B (mittspänn).

Avsikten med ovanstående figurer har framförallt varit att visa på betydelsen av parametrar som ledningshöjd och fasavstånd. Det framgår också att B-fältet på marknivå kan minskas genom att höja fasledarna och genom kompaktering. De absoluta talen i figurerna är möjligen av mindre intresse eftersom strömstyrkan valts mer eller mindre godtyckligt till 500 A. I en studie av långtidseffekter kan detta värde vara för högt och det är definitivt för lågt om man söker fältets maxvärden. Figur 34 visar som exempel B-fältet mitt i spannet (linhöjd 7,8 m) under två 400 kV ledningar med 12 respektive 9 meters fasavstånd och med 500 och 1 000 A. Större fasavstånd leder till något högre fält och framförallt ett bredare område med förhöjt fält.

Redovisade nivåer av den magnetiska flödestätheten 1 – 2 meter ovan mark ligger vid 500 A betydligt under aktuella insats/referensvärden på 100 μT för allmänheten och mycket under 500 μT för gruppen arbetstagare. Marginalen till dessa insatsvärden är så stor att magnetfältets korttidsvärden inte medför någon praktisk begränsning för ledarnas belastning.



Figur 34. Magnetisk flödestäthet (totalfält) under två 400 kV ledningar med 12 (Duplex) respektive 9 meters (Triplex) fasavstånd. Fältet anges för 2 m ovan mark. I = 500 och 1 000 A. Beräkningsplan B (mittspann).

7.2.2 Magnetisk flödestäthet i fasledarnas närhet

Höga magnetiska fält är en mer lokal företeelse i luftledningsmiljö än höga elektriska fält, men det finns ändå ett behov av att beskriva dessa närmare. Behovet blir särskilt påtagligt vid Arbete Med Spänning med den s k barhandsmetoden, vid vilken montören kommer mycket nära fasledarna. En svårighet i detta sammanhang är att strömmen kan variera betydligt och en generell beräkning kan bara baseras på ett rimligt antagande. För 70–220 kV har strömmen antagits vara 500 A och för 400 kV har också allt räknats med 500 A men vissa kompletteringar har gjorts med 1 000 A. Då B-fältet är direkt proportionellt med strömmen kan redovisade värden enkelt räknas om till aktuell belastning.

B-fältet har beräknats längs samma linjer som E-fältet och beteckningarna enligt Figur 25 gäller även i detta fall.

Även B-fältet påverkas av stålstolpar och regler, men påverkan är betydligt mindre än för det elektriska fältet. Litteraturuppgifter visar på en lokal förstärkning av upp till 50 % vid 85 μT och lägre vid lägre fält [7]. B-fält av denna storleksordning vid stolpbenet i kombination med stolpben av stål, begränsar de aktuella fallen till normalt 220 och 400 kV, belastade med i storleksordningen 1 000 A. I tabellerna 14–22 har ingen hänsyn tagits till denna påverkan.

Beräkningarna baseras bara på ström i fasledarna, utan hänsyn till topplinor, marklinor etc, och resultatet blir därför oberoende av ledningarnas höjd över mark. Linje A1 ger därför samma resultat som linje B1 etc.

Luftledning: 70 kV, fasavstånd 4,0 m. 500 A Avstånd till riskområdet yttre gräns: 0,75 m Avstånd till närområdets yttre gräns: 1,75m											
B-fält (μT)	Avstånd i meter till den punkt där B-fältet underskrider angivet värde										
	Beräkningslinje										
	A1	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4	B5	B6
<1800	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	<100 μT	0,10	0,10	0,10	0,10
<500	0,25	0,20	0,25	0,25	0,20	0,25		0,20	0,25	0,25	0,20
<100	1,05	1,00	1,30	1,45	0,90	1,05		1,00	1,30	1,45	0,90

Tabell 14. B-fält längs linjer, 70 kV, 4 m fasavstånd. Data enligt avsnitt 5.1. Flödestätheten är < 100 μT längs hela linje B2.

Resultatet för de båda varianterna för 70 kV är givetvis mycket lika. Det kortare fasavståndet ger ett något högre fält mellan faserna, men skillnaden är högst måttlig. Fältet är vid 500 A alltid < 500 μT utanför riskområdet och < 100 μT utanför närområdet. Marginalen är så betydande att även vid 1 000 A, är fältet < 500 μT utanför riskområdet.

Luftledning: 70 kV, fasavstånd 3,0 m. 500 A Avstånd till riskområdet yttre gräns: 0,75 m Avstånd till närområdets yttre gräns: 1,75 m											
	Avstånd i meter till den punkt där B-fältet underskrider angivet värde										
	Beräkningslinje										
B-fält (μT)	A1	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4	B5	B6
<1800	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	<200 μT	0,10	0,10	0,10	0,10
<500	0,25	0,20	0,25	0,25	0,20	0,25		0,20	0,25	0,25	0,20
<100	1,05	1,00	-	-	0,85	1,05	0,70	1,00	-	-	0,85

Tabell 15. B-fält längs linjer, 70 kV, 3 m fasavstånd. Data enligt avsnitt 5.2.
Flödestätheten är < 200 μT längs hela linje B2.

Luftledning: 130 kV, fasavstånd 5,0 m Avstånd till riskområdet yttre gräns: 1,1 m Avstånd till närområdets yttre gräns: 3,0 m											
	Avstånd i meter till den punkt där B-fältet underskrider angivet värde										
	Beräkningslinje										
B-fält (μT)	A1	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4	B5	B6
<1800	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	<100 μT	0,10	0,10	0,10	0,10
<500	0,25	0,20	0,25	0,25	0,20	0,25		0,20	0,25	0,25	0,20
<100	1,05	1,00	1,15	1,25	0,90	1,05		1,00	1,15	1,25	0,90

Tabell 16. B-fält längs linjer, 130 kV, 5 m fasavstånd. Data enligt avsnitt 5.3.
Flödestätheten är < 100 μT längs hela linje B2.

Resultatet för de båda varianterna för 130 kV är mycket lika varandra och mycket lika resultatet för 70 kV. Det kortare fasavståndet ger ett något högre fält mellan faserna, men skillnaden är högst måttlig. Fältet är vid 500 A alltid < 500 μT utanför riskområdet och < 100 μT utanför närområdet. Marginalen är så betydande att även vid 1 000 A, är fältet < 500 μT utanför riskområdet.

Luftledning: 130 kV, fasavstånd 4,0 m Avstånd till riskområdet yttre gräns: 1,1 m Avstånd till närområdets yttre gräns: 3,0 m											
	Avstånd i meter till den punkt där B-fältet underskrider angivet värde										
	Beräkningslinje										
B-fält (μT)	A1	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4	B5	B6
<1800	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	<200 μT	0,10	0,10	0,10	0,10
<500	0,25	0,20	0,25	0,25	0,20	0,25		0,20	0,25	0,25	0,20
<100	1,05	1,00	1,30	1,45	0,90	1,05	0,70	1,00	1,30	1,45	0,90

Tabell 17. B-fält längs linjer, 130 kV, 4 m fasavstånd. Data enligt avsnitt 5.4. Flödestätheten är < 200 μT längs hela linje B2.

Luftledning: 220 kV, fasavstånd 7,2 m. Simplex Avstånd till riskområdet yttre gräns: 1,6 m Avstånd till närområdets yttre gräns: 3,0 m											
	Avstånd i meter till den punkt där B-fältet underskrider angivet värde										
	Beräkningslinje										
B-fält (μT)	A1	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4	B5	B6
<1800	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	<100 μT	0,10	0,10	0,10	0,10
<500	0,25	0,20	0,25	0,25	0,20	0,25		0,20	0,20	0,25	0,20
<100	1,05	1,00	1,10	0,95	0,95	1,05		1,00	0,90	0,95	0,95

Tabell 18. B-fält längs linjer, 220 kV, 7,2 m fasavstånd. Simplex. Data enligt avsnitt 5.5. Flödestätheten är < 100 μT längs hela linje B2.

Resultatet för de båda varianterna för 220 kV är delvis lika varandra, men Simplex respektive Duplex ger en någon olika fältbild närmast faslinorna. Det kan möjligen synas lite märkligt att fältet i fallet med Duplex ej överstiger 500 μT i linjerna A1, A3, B1 och B3. Orsaken till detta är att linjerna har sin 0-punkt mitt emellan de två faslinorna, i en punkt ca 0,2 m från faslinorna. Givetvis finns det även i dessa fall områden med B-fält överstigande både 500 och 1800 μT , men dessa punkter ligger inte på de valda beräkningslinjerna.

Fältet är vid 500 A alltid < 500 μT utanför riskområdet och < 100 μT utanför närområdet. Marginalen är så betydande att även vid 1 000 A, är fältet < 500 μT utanför riskområdet.

Luftledning: 220 kV, fasavstånd 7,2 m. Duplex Avstånd till riskområdet yttre gräns: 1,6 m Avstånd till närområdets yttre gräns: 3,0 m											
	Avstånd i meter till den punkt där B-fältet underskrider angivet värde										
	Beräkningslinje										
B-fält (μT)	A1	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4	B5	B6
<1800	<500	<500	0,30	0,30	0,30	<500	<100 μT	<500	0,30	0,30	0,30
<500	μT	μT	0,35	0,35	0,35	μT		μT	0,35	0,35	0,35
<100	1,00	0,95	1,15	1,20	1,00	1,00		0,95	1,15	1,20	1,00

Tabell 19. B-fält längs linjer, 220 kV, 7,2 m fasavstånd. Duplex. Data enligt avsnitt 5.6. Flödestätheten är < 100 μT längs hela linje B2 och alltid < 500 μT längs linjerna A1 och A3.

Luftledning: 400 kV, fasavstånd 12,0 m. Duplex Avstånd till riskområdet yttre gräns: 2,7 m Avstånd till närområdets yttre gräns: 5,1 m											
	Avstånd i meter till den punkt där B-fältet underskrider angivet värde										
	Beräkningslinje										
B-fält (μT)	A1	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4	B5	B6
<1800	<500	<500	0,30	0,30	0,30	<500	<50 μT	<500	0,30	0,30	0,30
<500	μT	μT	0,35	0,35	0,35	μT		μT	0,35	0,35	0,35
<100	1,00	0,95	1,10	1,15	1,00	1,00		0,95	1,10	1,15	1,00

Tabell 20. B-fält längs linjer, 400 kV, 12,0 m fasavstånd. Duplex. Data enligt avsnitt 5.7. Flödestätheten är alltid <50 μT längs linje B2 och alltid < 500 μT längs linjerna A1, A3, B1 och B3.

Resultatet för de tre varianterna för 400 kV är delvis lika varandra, men Duplex respektive Triplex ger även i detta fall en något annan fältbild närmast faslinorna. Likaså påverkar fasavståndet framförallt B-fältet mellan faslinorna. Även i detta fall, med Duplex och Triplex, ligger vissa av beräkningslinjernas 0-punkt på ett visst avstånd från faslinorna och fältet når ej de högsta nivåerna. Givetvis finns det även i dessa fall områden med B-fält överstigande både 500 och 1800 μT , men dessa punkter ligger inte på de valda beräkningslinjerna.

Luftledning: 400 kV, fasavstånd 11,0 m. Triplex Avstånd till riskområdet yttre gräns: 2,7 m Avstånd till närområdets yttre gräns: 5,1 m											
	Avstånd i meter till den punkt där B-fältet underskrider angivet värde										
	Beräkningslinje										
B-fält (μT)	A1	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4	B5	B6
<1800	<1000 μT	<1000 μT	<1000 μT	0,05	0,05	0,05	<50 μT	0,05	<1000 μT	0,05	0,05
<500	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10		0,10	0,10	0,10	0,10
<100	0,80	0,80	1,00	0,95	0,90	0,80		0,80	1,00	0,95	0,90

Tabell 21. B-fält längs linjer, 400 kV, 11,0 m fasavstånd. Triplex. Data enligt avsnitt 5.8. Flödestätheten är alltid < 50 μT längs linje B2 och alltid < 1000 μT längs linjerna A1, A3, A4 och B4.

Fältet är vid 500 A alltid < 500 μT utanför riskområdet och < 100 μT utanför närområdet. Marginalen är så betydande att även vid 1 000 A, är fältet utanför riskområdet <500 μT.

Luftledning: 400 kV, fasavstånd 9,0 m. Triplex Avstånd till riskområdet yttre gräns: 2,7 m Avstånd till närområdets yttre gräns: 5,1 m											
	Avstånd i meter till den punkt där B-fältet underskrider angivet värde										
	Beräkningslinje										
B-fält (μT)	A1	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4	B5	B6
<1800	0,05	0,05	<1000 μT	0,05	0,05	0,05	<50 μT	0,05	<1000 μT	0,05	0,05
<500	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10		0,10	0,10	0,10	0,10
<100	0,80	0,80	1,00	1,10	0,90	0,80		0,80	1,00	1,10	0,90

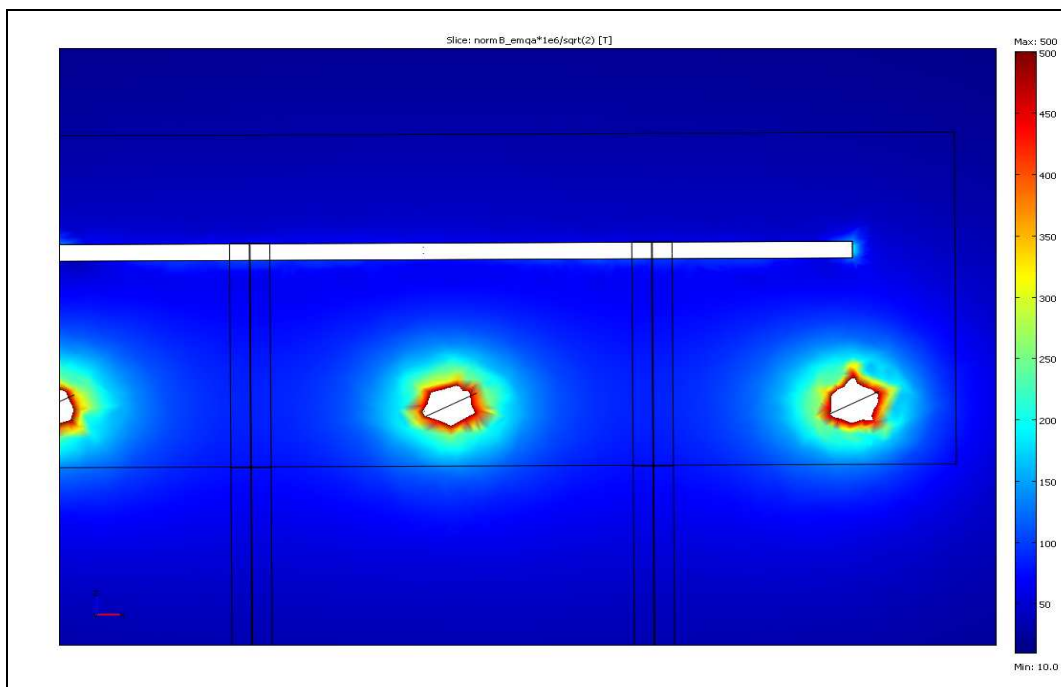
Tabell 22. B-fält längs linjer, 400 kV, 9,0 m fasavstånd. Triplex. Data enligt avsnitt 5.9. Flödestätheten är alltid < 50 μT längs linje B2 och alltid < 1000 μT längs linjerna A4 och B4.

7.2.3 Magnetisk flödestäthet nära stolpben och regler

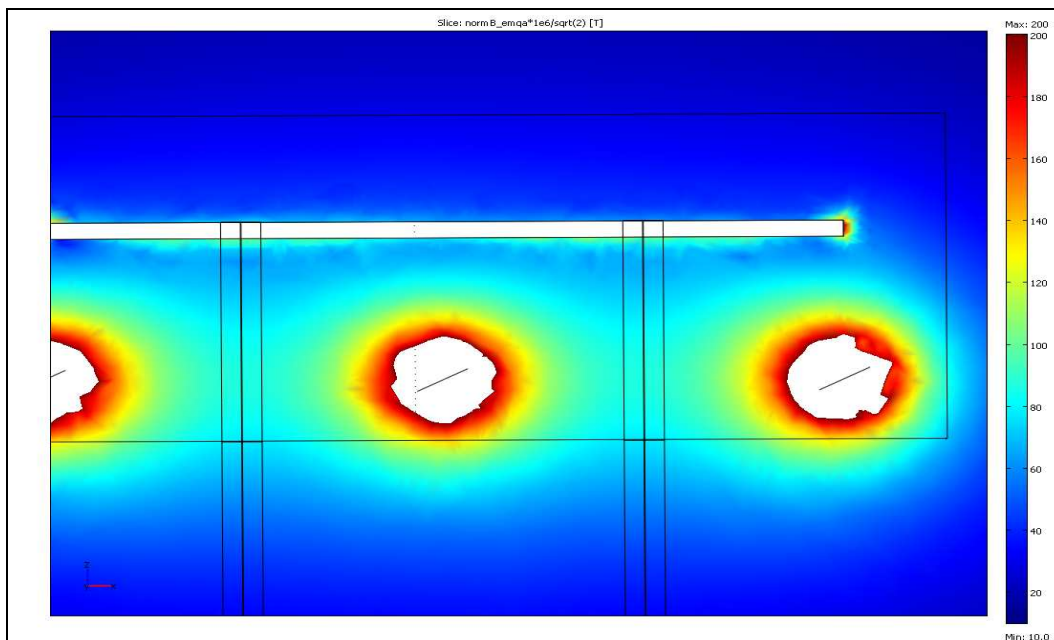
Utförda numeriska 3D-beräkningar visar att den magnetiska flödestätheten påverkas påtagligt av framförallt reglarna av stål med relativ permeabiliteten $\mu_r = 4000$.

Skillnaden är påtaglig närmast regeln, där fältet är i storleksordningen dubbelt så högt som utan stolpben, men redan på 1 meters avstånd från

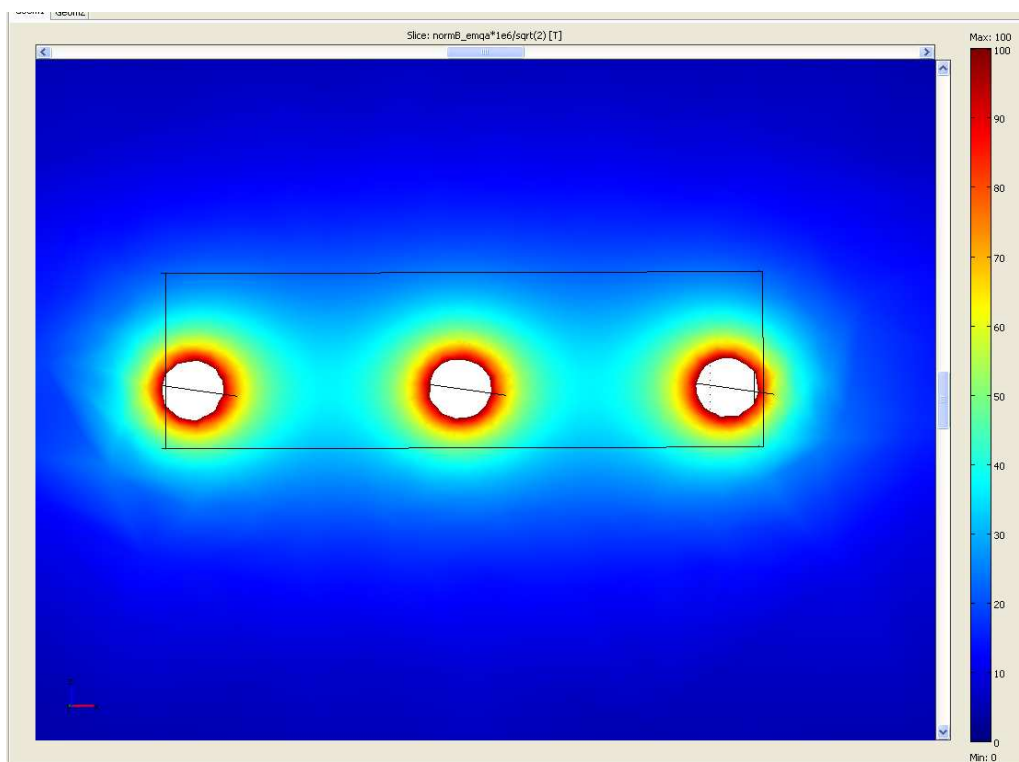
regeln har denna påverkan minskat högst betydligt. Notera även fältförstärkningen vid regelspetsarna.



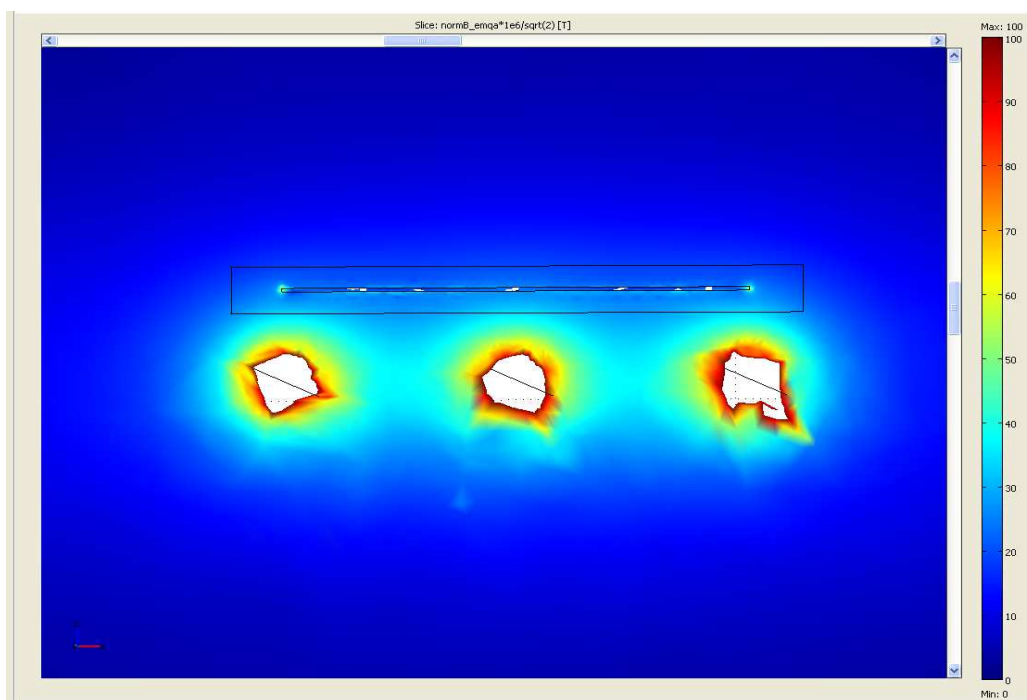
Figur 35. Magnetisk flödestäthet 130 kV. Tvärsnitt genom regeln. Beräknat vid 500 A. Skalans maxvärde är 500 μ T. Vit färg anger högre fält.



Figur 36. Magnetisk flödestäthet 130 kV. Detalj genom regeln, i övrigt samma modell som i Figur 35. Beräknat vid 500 A. Skalans maxvärde är 200 μ T. Vit färg anger högre fält.

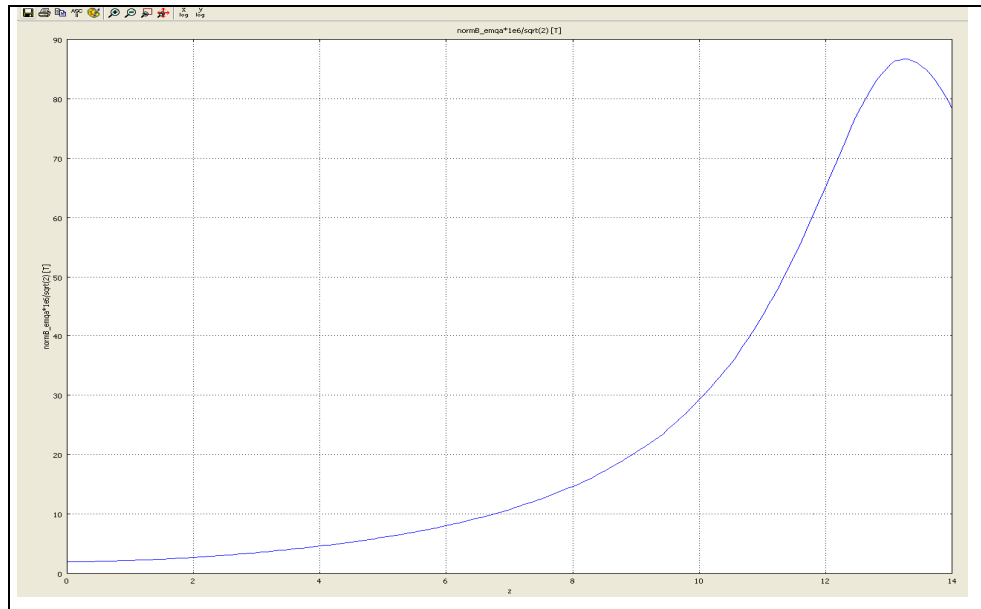


Figur 37. Magnetisk flödestäthet 400 kV, endast fasledare. Beräknat vid 500 A. Skalans maxvärde är 100 μ T. Vit färg anger högre fält.

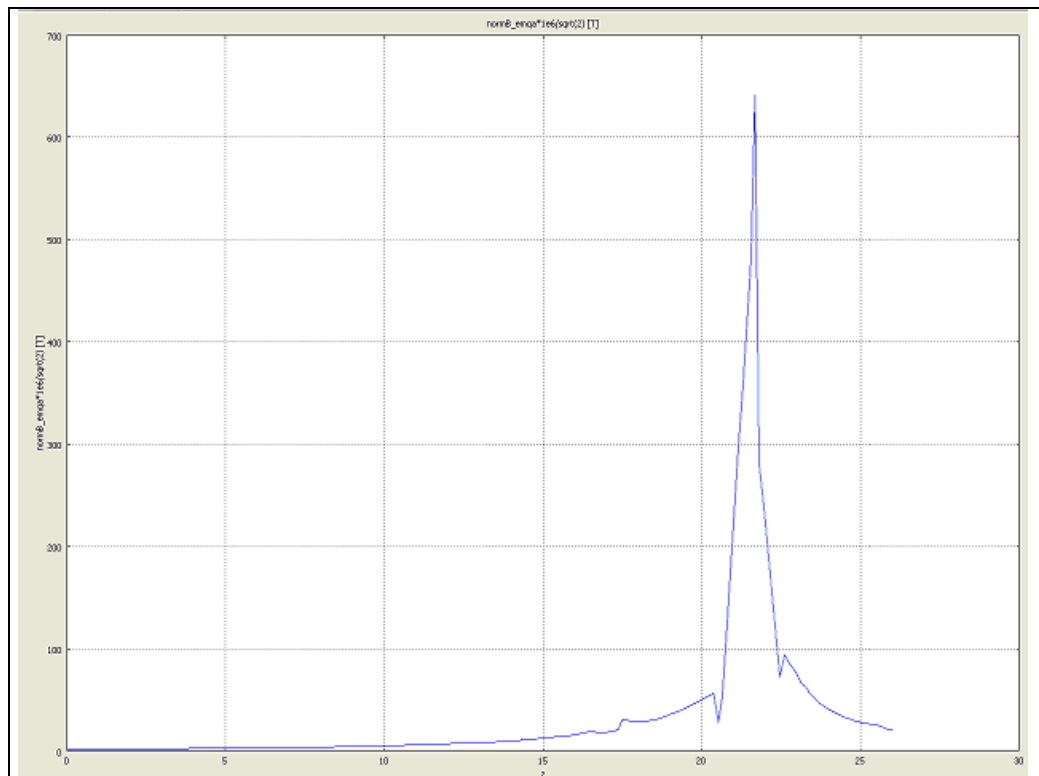


Figur 38. Magnetisk flödestäthet 400 kV, fasledare och regel. Beräknat vid 500 A. Skalans maxvärde är 100 μ T. Vit färg anger högre fält.

Den magnetiska flödestätheten längs stolpbenen har beräknats för både 130 och 400 kV. För 130 kV – med trästolpe – blir kurvan ”mjuk”, medan fackverksstrukturen på 400 kV medför en betydligt mer ”hackig” kurva. Se Figur 39 och 40.



Figur 39. 130 kV/500 A. Magnetisk flödestäthet vid klättring 0,2 m utanför stolpbenet, med ryggen vinkelrätt mot ledningen. Den vertikala skalan omfattar 0 till 90 μT , med 10 μT per ruta. Den horisontella skalan sträcker sig från 0 till 14 m, med 2 m per ruta. Jämför med Figur 29, som visar motsvarande för den elektriska fältstyrkan.



Figur 40. 400 kV / 500 A. Magnetisk flödestäthet vid klättring längs stolpbenet, med ryggen vinkelrätt mot ledningen. Den mycket markanta piken mellan 20 och 25 m orsakas av de balkar som formar den undre delen av regeln. Det är inte troligt att det verkliga fältet når dessa nivåer, utan att detta kan vara ett exempel på de svårigheter som kan uppstå vid beräkning av 3-dimensionella magnetiska fält och i synnerhet då man även inkluderar ferritiska material i modellen. Jämför med Figur 47 som visar motsvarande uppmätta kurva och en närmast identiskt beräknad kurva, båda utan denna pik. Jämför även med Figur 30, som visar motsvarande för den elektriska fältstyrkan.

Den vertikala skalan omfattar 0 till 700 μT , med 100 μT per ruta. Den horisontella skalan sträcker sig från 0 till 30 m, med 5 m per ruta.

8 Verifierande mätningar

8.1 Instrument

Elektriska och magnetiska fält under kraftledningar och på 1–2 meters höjd kan mätas med vanliga instrument, men fält längs stolpben och överhuvudtaget på högre höjd kräver ett mer specialiserat instrument. EHP-50C från Narda Safety Test Solutions är ett instrument som ger möjlighet till denna typ av mätningar.

EHP-50 C är en programmerbar fältanalysator för B- och E-fält, med kommunikation till handenhet via t ex optisk fiber samt med loggerfunktion för automatisk mätning och lagring av data i själva mätinstrumentet. Instrumentet kan kommunicera med handenheten 8053 eller med en handdator typ HP iPAQ hx2190. Programmering sker från en vanlig PC via USB-anslutning.

Nedan ges viktigare data för EHP-50 C

Frekvensområde:	5 Hz – 100 kHz
Mätområde, E-fält:	0,01 V/m – 100 kV/m. Max: 200 kV/m vid 50 Hz
Mätområde, B-fält:	1 nT – 10 mT. Max: 20 mT vid 50 Hz
Känslighet, E-fält:	0,01 V/m
Känslighet, B-fält:	1 nT
Likformighet mellan de tre mätriktningarna:	± 1 dB
Linjeartitet, E-fält:	$\pm 0,2$ dB (1 V/m – 100 kV/m)
Linjeartitet, B-fält:	$\pm 0,2$ dB (200 nT – 10 mT)
Intern datalogger:	Mätning var 30:e sek eller var 60:e sek
FFT	Inbyggd
Frekvensområden:	100, 200, 500 Hz, 1, 2, 10 och 100 kHz
Temperaturdrift:	$\pm 0,05$ dB mellan -10 och $+23$ gr C, RH = 40 % $\pm 0,01$ dB mellan $+23$ och $+50$ gr C, RH = 40 %
Drift pga fuktighet:	$\pm 0,05$ dB mellan 20 % och 50 %, T = 23 gr C $\pm 0,05$ dB mellan 50 % och 80 %, T = 23 gr C
Storlek:	92 x 92 x 109 mm
Vikt:	525 gram
Drifttid:	> 10 timmar vid normal drift > 150 timmar vid lågeffekt drift
Kommunikation:	Optisk fiber, maximalt 80 m

För att möjliggöra mätningar längs stolpben och liknande har ett särskilt mätsystem byggts upp kring EHP-50 C bestående av:

Fältnätinstrument EHP-50 C

Optisk fiber, längd 40 m, med kraftigt skyddshölje för utomhusbruk

8053-OC omvandlare mellan optisk signal och RS 232

Handdator HP iPAQ hx2190

Isolerande rep, längd 100 m, typ EdF – 8 mm, för positionering av EHP-50 C.
Maximal arbetslast 35 kg.

Diverse utrustning som stroppar, schacklar, karbinhakar och förvaringskärl för rep och fiber.

Mätsystemet kan utan besvär bäras av en man men två man rekommenderas vid mätning i stolpar och liknande, en man för att avläsa instrumentet och en för att positionera instrumentet.



Figur 41. Mätsystem för mätning av B- och E-fält nära spänningssatta föremål. På bilden är mätinstrumentet monterat i en hållare av Lexan som hänger i ett isolerande rep. Till vänster står en trumma med optisk fiber och i mitten syns den lilla handdatorn för avläsning av mätdata.

8.2 Mätningar och resultat

8.2.1 Mätning 130 kV

Den 12 maj 2009 genomfördes en mätning av den elektriska fältstyrkan längs ett stolpben på en 130 kV ledning i Mellansverige. Stolptypen stämmer ej helt överens med de beräknade typfallen, men skillnaderna är inte större än att resultatet ändå är väl användbart. Se Figur 43 – 44.

Spänning: 138 kV

Linarea: 593 mm²

Fasavstånd: 4,0 m

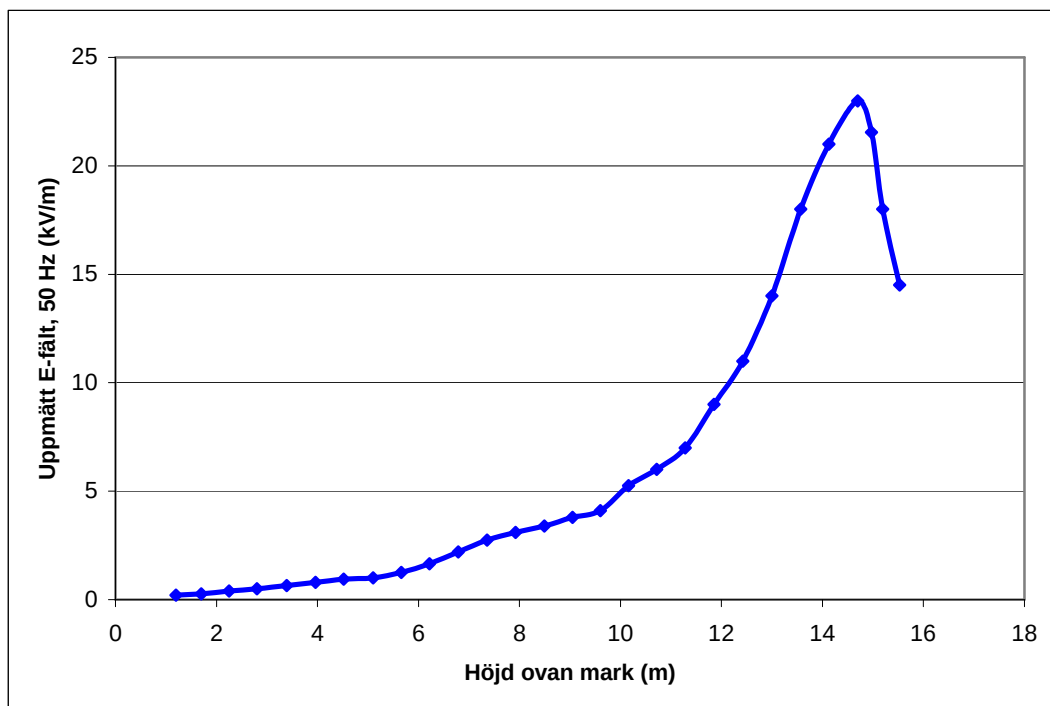
Höjd till faslina: 15,0 m

Höjd till regel (ojordad): 16,4 m

Stolpben klädda med jordat nät upp till ca: 13,5 m

Stolpen invändigt krysstagad och försedd med brygga.

Den aktuella dagen var ledningen i stort sett obelastad, varför någon magnetfältsmätning inte kunde göras.



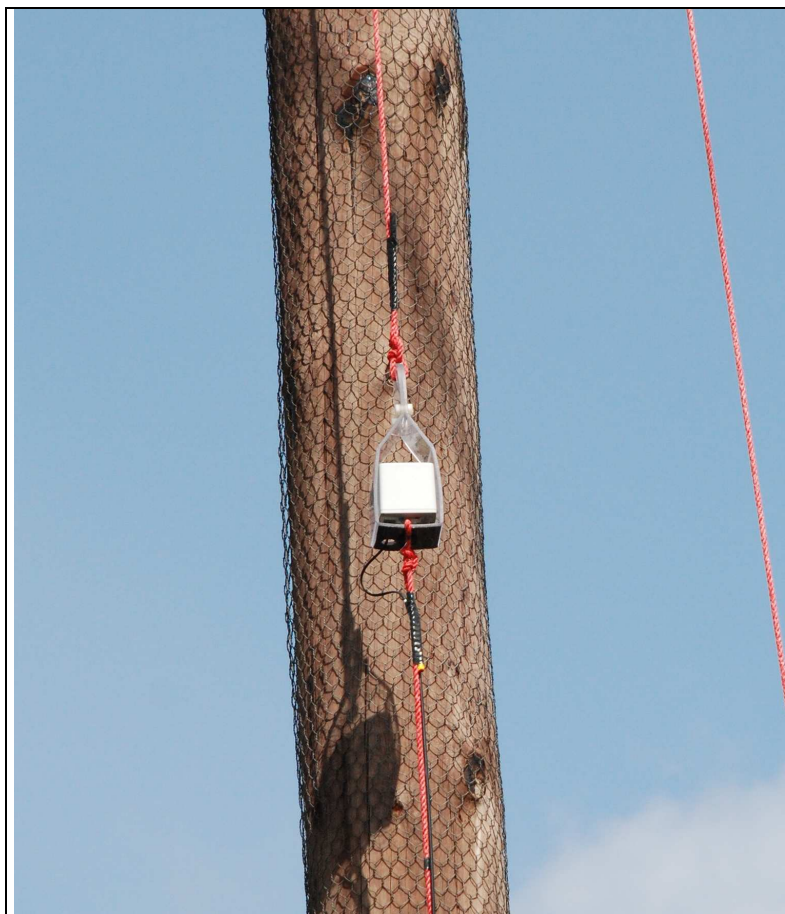
Figur 42. Uppmätt elektrisk fältstyrka längs ett stolpben vid 138 kV.

Den uppmätta kurvan kan jämföras med kurvan Figur 29. Den senare är beräknad med 135 kV och ojordade stolpben. Den uppmätta gäller för något högre spänning - 138 kV - och delvis jordade stolpen. Uppmätta värden skall

därför ligga något över beräknade. Beräknat max värde är 21,5 kV och uppmätt 23 kV/m, vilket därför synes rimligt. Även en sträcka under faslinorna ligger den uppmätta kurvan högre än den beräknade, vilket också kan bero på inverkan av det jordade nätets övre kant och bryggan mellan stolpbenen.



Figur 43. Stolpben med nät, invändigt krysstag och brygga. E-fältet mättes längs det vänstra stolpbenet.



Figur 44. Mätproben längs stolpbenet.

8.2.2 Mätning 400 kV

Den 1 juli 2009 genomfördes motsvarande mätning av elektrisk fältstyrka och magnetisk flödestäthet längs ett stolpben på en 400 kV ledning i Mellansverige. Även i detta fall avviker stolptypen något från de som använts vid beräkningarna, men avvikelserna är inte mer påtagliga än att resultatet kan användas för att verifiera de beräkningar som tidigare utförts.

Spänning: 406 kV

Ström: 1383 A

Linarea: 3 x 593 mm²

Fasavstånd: 12,5 m

Höjd till faslina: 20,5 m

Höjd till regel: 26,5 m (till undre kant)

Det stora fasavståndet är en följd av att isolatorkedjorna är monterade i gungor. Detta förlänger även avståndet mellan regel och faslina. Se Figur 45 och 46.

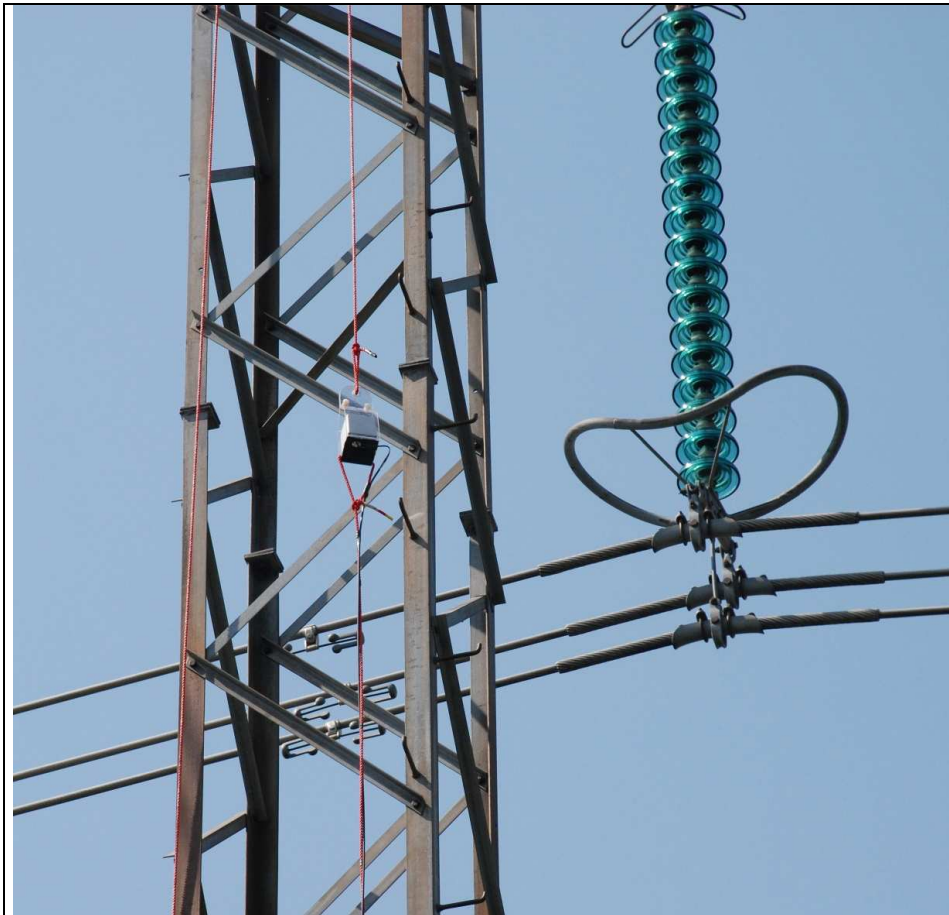


Figur 45. Stolpe för 400 kV. Mätningarna genomfördes längs "insidan" av det vänstra stolpbenet, mot mittfasen.

Figur 47 visar den uppmätta elektriska fältstyrkan och den samtidigt den uppmätta och den beräknade magnetiska flödestätheten.

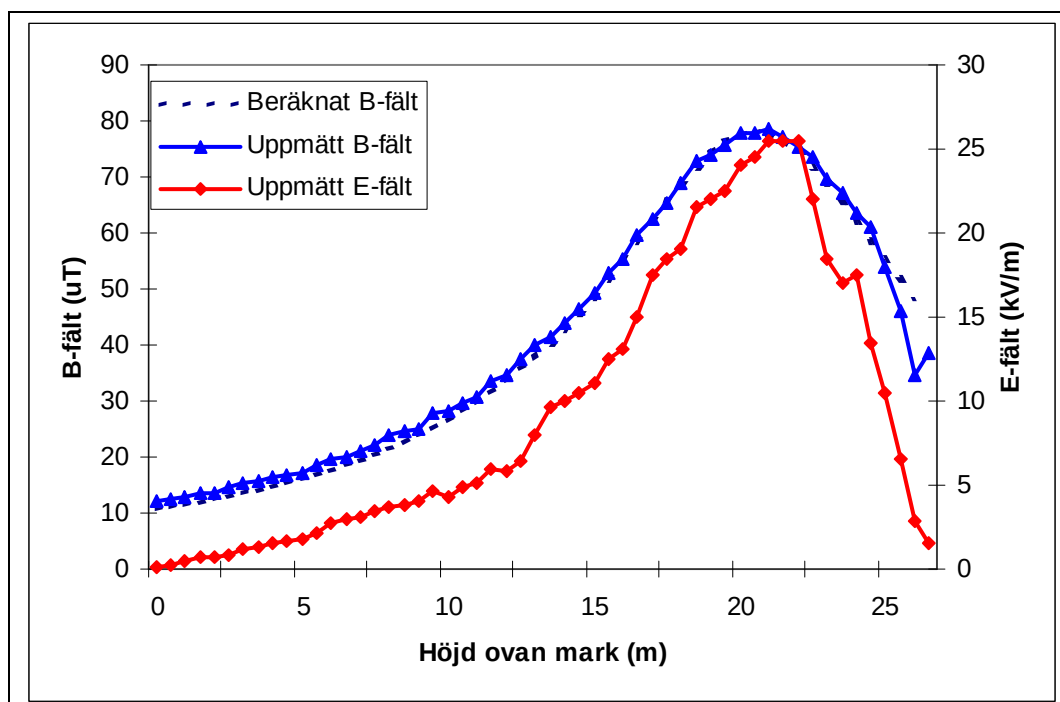
Det maximala E-fältet fås i nivå med fasledarna och uppgår till ca 25 kV/m. Möjligen är maxvärdet något förskjutet uppåt, vilket då kan bero på inverkan av den jordade regeln. Kurvan kan närmast jämföras med den i Figur 30, vilken uppvisar ett antal toppar orsakade av stagen i stolpen på ca 35 kV/m och en "medellinje" med ett maxvärde på ca 27 kV/m. Beräkningslinjen ligger dock på stolpbenet "utsida", mot ytterfasen, och mätlinjen löper längs benets insida med stegpinnar. Fältet är generellt högre på "utsidan" än på "insidan" och beräkningarna har genomförts med 9 m fasavstånd mot 12,5 m i det

uppmätta fallet. Sammantaget skulle man kunna förvänta sig betydligt högre E-fält i det beräknade fallet jämfört med i det uppmätta, men skillnaden är inte alls så stor som förväntat. En enkel analytisk beräkning visar att bara skillnaden i fasavstånd medför en skillnad i max fält på ca 45 %. Troligen är det så att fältstyrkan varierar kraftigt både längs stolpbenet och runt det, vilket gör det svårt att jämföra mätningar i något olika positioner.



Figur 46. Mätproben i position längs stolpbenet. På hörnet närmast proben finns stegpinnar för klättring.

Den magnetiska flödestätheten har sitt maxvärde på ca $78 \mu\text{T}$ mitt för fasledarna. Detta värde stämmer väl med det värde som kan beräknas analytiskt utifrån fasavstånd och ström. Med 1383 A och 12,5m fasavstånd fås ett maxvärde $78,5 \mu\text{T}$ och en form på kurvan som stämmer mycket väl med den uppmätta, se Figur 47. Detta innebär att stålet i stolpen har endast haft en marginell effekt på flödestätheten.



Figur 47. Uppmätt elektrisk fältstyrka (E-fält) och magnetisk flödestäthet (B-fält).

8.3 Diskussion mätningar

Genomförda mätningar visar att beräkningsmodellerna är rimligt korrekta och kan användas för att beräkna fält längs stolpben och reglar. Det har också visat sig att mätsystemet är smidigt och lättanvänt. Mätningen i 130 kV stolpen tog ca 3 timmar och den motsvarande i 400 kV stolpen ca 2,5 timme, vilket får anses vara kort tid och speciellt med tanke på att detta var de första "skarpa" mätningarna i denna miljö.

Givetvis finns det utrymme för förbättringar. Detta system, med en enkel handdator för resultatpresentation, medger bara presentation av totalfältet och inte av fältets komponenter. Detta är en begränsning vid analys av komplicerade exponeringsförhållanden, då man måste ta hänsyn till och eventuellt utnyttja komponenternas storleksförhållande. Denna begränsning i systemet försvinner om man nyttjar den mer avancerade (och betydligt dyrare) handenheten 8053 för resultatpresentation.

En svårighet skall dock nämnas och det är mätprobens rörelser med vinden. Även vid svag markvind kan vindbyarna bli påtagliga på lite högre höjd och de får proben att röra sig trots inspanning både uppåt och nedåt med det isolerande repet. I den här miljön med ett elektriskt fält som ändras påtagligt med avståndet till faslinorna och till stolpbenet, kan även små rörelser medföra förhållandevis stora variationer i det elektriska fältet. Dagens mätsystem innehåller tyvärr ingen funktion för medelvärdesbildning över en viss tidsperiod, men en sådan skulle kunna vara av stor nytta.

9 Slutsatser och rekommendationer för arbete i höga fält

Betydelsen av elektriska och magnetiska fält, och i synnerhet fält i närheten av kraftledningar, har avhandlats flitigt i litteraturen sedan slutet av 70-talet. Fokus har emellertid varit på fält i marknivå och inte på fält betydligt närmare faslinorna. Intresset för fält i arbetsmiljön har därtill varit svagt bortsett från studier av framförallt indirekta effekter av höga elektriska fält, som gnisturladdningar och kontaktströmmar. I och med 1998 års utgåva av ICNIRP Guidelines [1] och framförallt i och med EUs EMF-direktiv 2004/40/EG [2] kom arbetsmiljöaspekten av arbete i höga fält att bli högst aktuell. ICNIRPs riktlinjer kom att diskuteras och ifrågasättas och nu drygt 10 år efter att de publicerats, väntas en ny utgåva med eventuellt reviderade gränsvärden och insatsvärden. Då innehållet i den nya utgåvan ännu är okänt kan slutsatser och rekommendationer för arbete i höga fält bara baseras på existerande riktlinjer från 1998 respektive 2004 samt på de s k Exposure limit fields, som presenterats i förslag till ny standard. Rekommendationer för allmänhetens exponering utfärdades av EU redan 1999 [34].

Följande värden har legat till grund för slutsatserna i denna rapport:

Exponeringsfall	B- fält	E-fält
Insatsvärde för allmänheten vid 50 Hz, enligt ICNIRP 1998 och EU 1999	100 μ T	5 kV/m
Insatsvärde för arbetstagare vid 50 Hz, enligt ICNIRP 1998 och EU 2004	500 μ T	10 kV/m
Förhöjt värde för det elektriska fältet när det inte föreligger risk för kontakt med föremål på annan potential. Gäller endast arbetstagare, enligt ICNIRP 1998	-	20 kV/m
Exposure limit field prEN 50499:2006 och arbetsmaterial inom IEC WG 17. ¹	1800 μ T	46 kV/m

Tabell 23. Översikt av insatsvärden.

¹. I den slutliga versionen av standarden EN 50499 finns inte kolumnen med exposure limit field kvar i tabellen, men motsvarande värde finns fortfarande i texten under. I arbetsmaterialet inom IEC WG 17 (april 2009) finns dock exposure limit field kvar i samma tabellform som i prEN 50499:2006.

Om man jämför verkliga exponeringsförhållanden med värdena i Tabell 23, finner man att situationen för det elektriska fältet skiljer sig påtagligt från det magnetiska. De elektriska fälten är i praktiken förhållandevis höga och värden >10 kV kan förekomma lokalt under 400 kV ledningar. Höga magnetiska fält är däremot en betydligt mer lokal förekomst. B-fältet invid en enkelledare med 500 A passerar 500 μ T-gränsen redan på ett avstånd av 0,2 m.

Vid en bedömning av en exponeringssituation är avståndet till källan för fältet liksom kroppens position i förhållande till fältet av intresse. Generellt gäller att ett elektriskt fält som infaller parallellt med kroppens längdaxel (vanligen ett vertikalt fält och en stående person) är betydligt mer ogynnsamt än ett fält vinkelrätt längdaxeln. Skillnaden i inducerad ström i kroppen är mellan dessa fall större än en faktor 10 (jmf avsnitt 3, andra stycket på sid 10). Det elektriska fältet medför att en från jord isolerad person laddas upp och kan få uppleva en obehaglig urladdning vid kontakt med ett jordat föremål. Graden av obehag beror på uppladdningens storlek, vilken som visats bl a beror på kroppens orientering i fältet. Även den inducerade strömtätheten, som normalt är styrande i dessa sammanhang, påverkas på samma sätt av kroppens orientering i fältet. Detta har bl a visats i en tidigare rapport från Elforsk med titeln "Gnisturladdningar och kontaktströmmar" [37].

På marken under en luftledning är fältet huvudsakligen vertikalt medan fältet mellan faslinorna och närmast stolpbenen är mer eller mindre horisontellt. Detta innebär att en person som klättrar upp längs ett stolpben, i ett kraftigt och mer eller mindre horisontellt fält, möjligen inte behöver uppleva mer besvär av gnisturladdningar än den som står under ledningen, i ett närmast vertikalt fält.

Exemplet antyder en möjlighet att kunna dra fördel av fältets mer gynnsamma riktning vid vissa typer av arbete. Detta är dock ett vanskligt förfarande och ställer stora krav på bestämda arbetspositioner och medger små möjligheter för improvisation. Ett sådant förfarande kan därför inte rekommenderas, utan bedömningen av exponeringen bör baseras på ett E-fält i minst gynnsamma riktning. En större fältkomponent i annan, mer gynnsam riktning ger en större säkerhetsmarginal.

Det magnetiska fältet har störst påverkan på kroppen om det infaller i riktning bröst-rygg (pga att detta ger den största ytan för cirkulerande strömmar), men skillnaden mellan riktningar är inte lika påtaglig som för det elektriska fältet.

Detta resonemang visar att det är avståndet till faslinorna som är av primärt intresse, både för det elektriska och för det magnetiska fältet.

Avståndets betydelse möjliggör användning av de redan välkända begreppen *riskområde* och *närområde*, med fastlagda avstånd från spänningsförande anläggningsdel (1,1 resp. 3,0 m vid 132 kV och 2,7 resp. 5,1 vid 400 kV).

Miljön runt en generell luftledning kan delas in i tre "zoner" för de elektriska och magnetiska fälten.

- Zon 1: Fält längs markytan och någon meter däröver. Inverkan av stolpar och jordade konstruktioner är liten.
- Zon 2: Fält nära stolpben och reglar. Fältet kan lokalt vara kraftigt påverkat.
- Zon 3: Fält nära faslinorna. Fältet är högt och inverkan av stolpar och jordade konstruktioner är liten.

Fältbilden i den andra zonen kan vara komplex och beräkningar visar att den elektriska fältstyrkan kan fördubblas invid ett jordat stolpben. Bortsett från dessa lokala effekter, kan man dra följande slutsatser:

70 kV

Om ledningen hänger på min höjd (6,0 m) kan E-fältet 2 m ovan mark uppgå till max ca 2 kV/m.

Generellt < 20 kV/m utanför riskområdet och < 5 kV/m utanför närområdet.

130 kV

Om ledningen hänger på min höjd (6,5 m) kan E-fältet 2 m ovan mark uppgå till max ca 3 kV/m.

Generellt < 20 kV/m utanför riskområdet och < 5 kV/m utanför närområdet. Vid klättring längs stolpbenet kan fältet lokalt uppgå till drygt 20 kV/m.

220 kV

Om ledningen hänger på min höjd (7,0 m) kan E-fältet 2 m ovan mark uppgå till max ca 7 kV/m.

I allmänhet < 20 kV/m utanför riskområdet och < 10 kV/m utanför närområdet, undantaget är området mellan faslinor och stolpben där fältstyrkan alltid är > 10 kV/m. Fältstyrkor 20 - 30 kV/m kan förväntas vid klättring längs stolpbenet.

400 kV

Om ledningen hänger på min höjd (7,8 m) kan E-fältet 2 m ovan mark uppgå till max ca 12 kV/m.

Generellt < 45 kV/m utanför riskområdet och < 20 kV/m utanför närområdet. Höga fältstyrkor mellan faslinorna. För 9 m fasavstånd är fältstyrkan mellan faslinor och stolpben alltid > 20 kV/m. Vid klättring längs stolpbenet kan fältet lokalt uppgå till 30 - 35 kV/m.

Elektrisk fältstyrka överstigande insatsvärdet på 10 kV/m för arbetstagare kan således förväntas vid arbete i stolpar för 130 - 400 kV. Längs stolpben

och regler kan fältet överstiga det förhöjda insatsvärdet på 20 kV/m, men ej det s k Exposure limit field på 46 kV/m. Detta innebär att gränsvärdet för exponering avseende elektrisk fältstyrka ej skall överskridas. Lokalt mycket hög fältstyrka, >46 kV/m, förekommer nära fasledarna. Detta blir ett problem endast vid Arbete Med Spänning med barhandsmetoden och kan i dessa fall lösas genom att personalen använder en ledande dräkt.

Det elektriska fältet är lätt att avskärma med en ledande dräkt, med tyg med inslag av metalltrådar. En komplett dräkt bestående av en hel overall med huva, inner- och ytterhandskar samt skor och överdragsskor minskar E-fältet med ca 95 %. Med skärmning av ansiktet med ett ledande visir fås ytterligare några procents skärmning. För denna goda effekt krävs att de olika dräktdelarna är elektriskt förbundna till varandra och att resistansen mellan delarna hålls låg. I praktiken kopplas de olika delarna till varandra med tryckknappar och detta gör att på- och avklädning går tämligen fort, även om en hjälpende hand här och där kan vara nödvändig. Marknaden för ledande dräkter är begränsad och det finns bara ett fåtal tillverkare. I USA dominerar dräkter från Euclid Garment Manufacturing Company i Ohio och i Europa dräkter från franska EdF Serect. De franska dräkterna säljs här i Norden av Ragnar Stålskog AB i Upplands Väsby. Figur 48 visar en montör från norska Eltel Networks iklädd den franska dräkten. För utförande och prov av ledande dräkter finns en IEC-standard [30].

Användning av ledande dräkt rekommenderas för allt barhandsarbete vid spänningar från 130 kV och uppåt. För lägre spänningar torde inte barhandsarbete komma ifråga då avstånden mellan fas och jord blir så korta att det helt enkelt inte finns plats för någon montör vid faslinan. Dräkten kan också användas vid arbete på avstånd – med isolerstångsmetoden – då den minskar risken för besvärande gnisturladdningar mellan kropp och stolpe, men nyttan måste i dessa fall vägas mot besväret att ta på och av dräkten samt att den är mer otymplig än en vanlig arbetsoverall. Ett alternativ – vid måttligt höga fältstyrkor – är en enklare dräkt tillverkad av ett smidigare tyg av den typ som tillverkas av Swiss Shield och marknadsförs i Sverige av RTK. En enkel dräkt av sådant tyg togs fram och provades fram i det tidigare elforskprojektet om gnisturladdningar och kontaktströmmar [37]. Tyget används normalt för att avskärma högfrekventa fält, men uppvisar god skärmverkan även vid 50 Hz. Dräkter av typen underställ kan fås uppsydda av företaget ELRO i Målsryd.

70/130/220/400 kV magnetisk flödestäthet

Om den magnetiska flödestätheten är det svårare att dra generella slutsatser eftersom strömmen kan anta högst skilda värden. Vid 500 A och med ledningarna i minimihöjd kan flödestätheten 2 m ovan mark uppgå till som högst ca 25 μT (77 kV och 4 m fasavstånd), långt ifrån aktuella insatsvärden på 100 respektive 500 μT . Vid 1 000 A ökar dessa värden för 400 kV ledningarna till strax över 35 μT .

Fältet avtar snabbt från faslinorna och vid närområdets yttre gräns är B-fältet alltid < 500 μT och vid närområdets yttre gräns alltid < 100 μT , räknat med 500 A. Även vid 1 000 A är fältet alltid < 500 μT vid närområdets yttre gräns.

B-fältet ökar något invid detaljer av ferromagnetiskt material men ökningen är måttlig vid aktuella avstånd och fältnivåer. Antag en 400 kV ledning med 1 000 A. Vid 3,8 meters avstånd (avståndet faslina-regel) fås ett opåverkat fält av ca 50 μT . Med en antagen fältförstärkning på 50 % fås ett påverkat fält av ca 75 μT och en stor marginal upp till det aktuella insatsvärdet på 500 μT .

Den magnetiska flödestätheten blir ett stort problem endast vid barhandsarbete, när montören kommer nära eller i direktkontakt med den strömförande faslinan. Framförallt händerna men ibland även bålarna kan vid dessa arbetsoperationer komma mycket nära och exponeras för fält överstigande det ovan nämnda *Exposure limit field* på 1 800 μT . Speciellt vid sådant arbete krävs stor disciplin och ett väl inövat rörelsemönster för att begränsa exponeringen så långt det är möjligt. Exponering av huvud och ryggmärgskanal bör begränsas så långt det är möjligt.

För det magnetiska fältet är avståndet den faktor som enklast kan påverkas. Den andra möjligheten är att begränsa strömmen, men detta kräver i allmänhet omkopplingar i nätet och blir i praktiken en besvärlig metod.

De möjligheter att avskärma det magnetiska fältet med en lämplig dräkt, som diskuterats i en ISH-artikel [31], befinner sig ännu på beräkningsstadiet och det torde dröja innan en färdig dräkt finns på marknaden.

Sammanfattningsvis kan man konstatera att arbete i närheten av luftledningarna medför exponering för elektriska och magnetiska fält, men att det nästan utan undantag är bara underhållspersonal med särskild utbildning som kan komma att exponeras för fält överstigande aktuella insatsvärden från ICNIRP/EU. Vid Arbete Med Spänning och i synnerhet med barhandsmetoden kan exponeringen bli särskilt hög. Noggrann planering inför arbetet, disciplinerat arbete och i de mer extrema fallen - bruk av skyddskläder löser dock de flesta problem. Elektriska och magnetiska fält behöver därför inte innebära några oöverstigliga hinder för Arbete Med Spänning eller annat underhållsarbete.



Figur 48. Montör från ELTEL Networks i ledande dräkt inköpt från franska EDF Serect. Dräkten är en hel overall med hög krage. Den kompletteras utanpå skorna med överdragssockor, som knäpps ihop med byxbenen. Handskarna är dubbla och knäpps likaså ihop med overallen. På bilden bär montören en huva, likaså förbunden med overallen. Dräkten kan dessutom kompletteras med ett ledande visir för bästa skyddsverkan.

Nederst på byxbenen ses den blå triangeln som anger att dräkten uppfyller fordringarna enligt IEC-standard 60895.

10 Referenser

- 1 ICNIRP Guidelines. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electro-magnetic fields (up to 300 GHz). Health Physics April 1998, Volume 74, No 4. pp 494 – 522.
- 2 Europaparlamentets och rådets direktiv 2004/40/EG 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).
- 3 Gamberale, Francesco m fl: Akuta effekter av lågfrekventa elektro-magnetiska fält. En fältstudie av linjearbetare i 400 kV ledningar. Arbete och Hälsa 1988:12.
- 4 Törnqvist, Siv m fl: Hälsorisker i arbete med elproduktion och eldistribution – slutrapport från en prospektiv studie. Arbete och Hälsa 1998:9.
- 5 Conti, R; Nicolini, P; D'Ajello, L; Ricca, M and Vecchia, P: Live-line maintenance works – Characterization of human exposure to 50 Hz electric and magnetic fields in view of a correct formulation of occupational protective standards.
- 6 Engelmann, E and Kindersberger, J: Magnetic field stress during live working in high voltage transmission lines. Proceedings of the 5 th International Conference on Live Maintenance – ICOLIM 2000, pp 187-195.
- 7 Kato, K; Goto, N; Shimizu, M and Okubo, H: Influence of ferromagnetic structure on ELF magnetic field environment in electric power facilities. High Voltage Engineering Symposium. ISH. 2001. Publ No 1-14.
- 8 Nowacki, T; Nadolny, Z and Rakowska, A: Analysis of electromagnetic field influence on technical personnel around working high-voltage lines. XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering. 2003. Publ P22.
- 9 Nadolny, Zbigniew; Nowacki, Tadeusz and Rakowska, Aleksandra: Electric and magnetic Field Analysis in Live Maintenance, Using High Potential Method and from Distance Method, Based on Computer Simulation and Measurement Results. Proceedings of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering. 2005. Publ A-08.
- 10 Cigré Working Group 01 of Study Committee 36: Environmental effects of electric fields near power transmission networks. Electra no 94. May 1984.
- 11 Hutzler, B et al: Exposure to 50 Hz magnetic fields during live work. Cigré 36-106. Session 1994.
- 12 Dawson, T W; Caputa, K and Stuchly, Maria A: A comparison of 60 Hz uniform magnetic and electric induction in the human body. Physics in Medicine And Biology. Vol 42. 1997. pp 2319-2329.

- 13 Dawson, T W; Caputa, K and Stuchly M A: Organ Dosimetry for Human Exposure to Non-Uniform 60-Hz Magnetic Fields. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol 14. No. 4. Oct 1998. pp 1234-1239.
- 14 Dimbylow, P J: Induced current densities from low-frequency magnetic fields in a 2 mm resolution, anatomically realistic model of the body. Physics in Medicine And Biology. Vol 43. 1998. pp 221-230.
- 15 Dawson, T W and Stuchly M A: Effects of skeletal muscle anisotropy on human organ dosimetry under 60 Hz uniform magnetic field exposure. Physics in Medicine And Biology. Vol 43. 1998. pp 1059-1074.
- 16 Dawson, T W; Caputa, K and Stuchly M A: Numerical evaluation of 60 Hz magnetic induction in the human body in complex occupational environments. Physics in Medicine And Biology. Vol 44. 1999. pp 1025-1040.
- 17 Stuchly, M A and Dawson, T W: Interaction of Low-Frequency Electric and Magnetic Fields with the Human Body. Proceedings of the IEEE. Vol 88. No 5. May 2000.
- 18 Dimbylow, P J: Current densities in a 2 mm resolution anatomically realistic model of the body induced by low frequency electric fields. Physics in Medicine And Biology. Vol 45. 2000. pp 1013-1022.
- 19 Dawson, T W; Caputa, K and Stuchly, M A: Magnetic field exposures for UK live-line workers. Physics in Medicine And Biology. Vol 47. 2002. pp 995-1012.
- 20 Caputa, K; Dimbylow, P J; Dawson T W and Stuchly M A: Modelling fields induced in humans by 50/60 Hz magnetic fields: reliability of the results and effects of model variations. Physics in Medicine And Biology. Vol 47. 2002. pp 1391-1398.
- 21 Dimbylow, P: Development of the female voxel phantom, NAOMI, and its application to calculations of induced current densities and electric fields from applied low frequency magnetic and electric fields. Physics in Medicine And Biology. Vol 50. 2005. pp 1047-1070.
- 22 Dimbylow, P: Quandaries in the application of the ICNIRP low-frequency basic restriction on current density. Physics in Medicine And Biology. Vol 53. 2008. pp 133-145.
- 23 IEC 62226-3-1. Ed 1. 2007-05. Exposure to electric or magnetic fields in the low and intermediate frequency range – Methods for calculating the current density and internal electrical field induced in the human body – Part 3-1: Exposure to electric field – Analytical and 2D numerical models.
- 24 IEC 62311. Ed 1. 2007-08. Assessment of electronic and electrical equipment related to human exposure restrictions for electromagnetic fields (0 Hz – 300 GHz).
- 25 EN 50499. Dec 2008. Procedure of the assessment of the exposure of workers to electromagnetic fields. Som svensk standard med titeln "Tillvägagångssätt för bedömning av arbetstagares för elektromagnetiska fält" gäller europastandarden EN 50 499:2008.
Även Draft prEN 50499 Oct 2006 och FprEN 50499 February 2008.

- 26 Bracken, T D and Dawson, T: Evaluation of Nonuniform 60-Hertz Magnetic-Field Exposures for Compliance with Guidelines. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. October 2004. pp 629-638.
- 27 IEC 62226-2-1. Exposure to electric or magnetic fields in the low and intermediate frequency range – Methods for calculating the current density and internal electric field induced in the human body – Part 2-1: Exposure to magnetic fields – 2D models. First edition 2004-11.
- 28 Leitgeb, N: Assessment of multiple frequency ELF electric and magnetic field exposure. *Physics in Medicine And Biology*. Vol 53. 2008. pp 431-443.
- 29 Hotte, P W et al: Electrical Performance of conductive suits. *IEEE transactions on Power Delivery*. Vol 12. No 3. July 1997. pp 1193-1201.
- 30 IEC 60895 Second Edition 2002-08. Live working – Conductive clothing for use at nominal voltage up to 8020 kV a.c. and ± 600 kV d.c.
- 31 Suk Won Min and Ki Hyun Song: Magnetic Field Reduction Characteristics of Hot-line Worker's Shielding Wear for 765 kV Double Circuit Transmission Line. XVth International Symposium on High Voltage Engineering. August 2007. Publ T1-440.
- 32 Cigré Publ No 278. The influence of line configuration on environment impacts of electrical origin. WG B2.06. August 2005.
- 33 Cigré Publ No 320. Characterisation of ELF magnetic fields. TF C4.205. April 2007.
- 34 Rådets rekommendation av den 12 juli 1999 om begränsning av allmänhetens exponering för elektromagnetiska fält (0 Hz – 300 GHz)
- 35 SS-EN 50 100-1. Utgåva 2. 2005-06-15. Skötsel av elektriska anläggningar.
- 36 Transmission Line Reference Book. 345 kV and Above. Second Edition. EPRI 1982.
- 37 Anette Larsson och Göran Olsson: Gnisturladdningar och kontaktströmmar. Elforsk rapport 07:36: 2007.