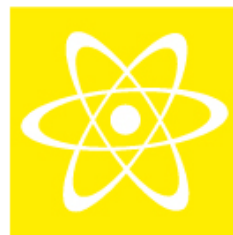
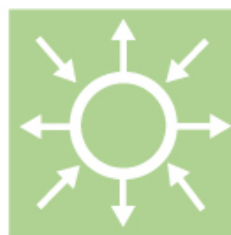




Arbete i höga elektriska och magnetiska fält. Del 2

Ställverk 70 – 420 kV

Elforsk rapport 10:108



Anette Larsson och Göran Olsson

September 2010

ELFORSK

Arbete i höga elektriska och magnetiska fält. Del 2

Ställverk 70 – 420 kV

Elforsk rapport 10:108

Förord

Elforsk har sedan 1990-talet bedrivit verksamhet inom området kraftfrekventa elektriska och magnetiska fält (EMF). Detta projekt har genomförts inom programmet under år 2008-2009 och omfattade 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
Eva Bergius och Lars Wallin, Svenska Kraftnät

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

Stockholm september 2010
Bengt Hanell
Elforsk AB
Programområde Överföring och distribution

Sammanfattning

Den elektriska fältstyrkan (E-fältet) och den magnetiska flödestätheten (B-fältet) har studerats i luftisolerade ställverk för 70 - 420 kV. Utgångspunkten för studien har varit att beskriva fälten i arbetsmiljön och då både vid rondning från marknivå och vid underhållsarbete, bl a Arbete Med Spänning. Avstånd mellan spänningsförande anläggningsdel och montören (den exponerade) har relaterats till de fastlagda avstånd som finns för riskområde och närområde för respektive spänningsnivå.

Uppmätta och beräknade värden har relaterats till de riktlinjer som idag finns tillgängliga. Existerade riktlinjer från ICNIRP är från 1998 och är nu under omarbetning. Ett förslag till nya riktlinjer publicerades 2009, men remissförfarandet är ännu inte klart. Bedömningarna i denna rapport har baserats på den senare utgåvan av ICNIRP Guidelines i kombination med utgåvan från 1998. I båda utgåvorna skiljer man mellan *Gränsvärde* och *Insatsvärde*. Det förra är grundat på direkt och omedelbar påverkan på kroppen och det senare är kopplat till gränsvärdet genom beräkningar. Gränsvärdet har tidigare uttryckts som en strömtäthet, med 10 mA/m^2 som gränsvärde vid 50 Hz. I 2009 års utgåva har man valt den inre (in situ) elektriska fältstyrkan som storhet. Gränsvärdet vid 50 Hz är 100 mV/m . Insatsvärdet är detsamma i de två utgåvorna; 10 kV/m respektive $500 \text{ }\mu\text{T}$ för arbetstagare och 50 Hz. Det gäller att exponering för fält över insatsvärdet inte nödvändigtvis behöver innebära att gränsvärdet överskrids.

Det elektriska fältet har beräknats både analytiskt och numeriskt. De förra går snabbare att utföra, men förutsätter enkel geometri och cylindriska kroppar. De senare kan hantera mer realistiska modeller, men inmatningen av data tar längre tid. I vissa fall har beräknade fältstyrkor kunnat jämföras med resultat från mätningar. Överensstämmelsen är oftast acceptabel, men i närheten av jordade apparatstativ mm kan avvikelser bli betydande. Den magnetiska flödestätheten har uteslutande beräknats analytiskt.

Beräkningar och mätningar visar att:

400 kV: Nära apparatstativ kan E-fältet överstiga 20 kV/m på 2 m höjd. På längre avstånd fås drygt 15 kV/m i äldre och ca 12 kV/m i ställverk av senare konstruktion. Vid riskområdets yttre gräns kan E-fältet vara $15\text{-}45 \text{ kV/m}$.

220 kV: Beräknat maxvärde för 2 m höjd och på något avstånd från stativ är ca 15 kV/m . Vid riskområdets yttre gräns fås $15\text{-}20 \text{ kV/m}$.

130 kV: Beräknat maxvärde för 2 m höjd och på något avstånd från stativ är ca 5 kV/m . Vid riskområdets yttre gräns fås $15\text{-}20 \text{ kV/m}$.

70 kV: Beräknat maxvärde för 2 m höjd och på något avstånd från stativ är ca 5 kV/m . Vid riskområdets yttre gräns fås ca 15 kV/m .

Jordade stativ mm påverkar E-fältets storlek och riktning, men det kan visas att det är E-fältets vertikala komponent som påverkar strömtäthet och fältstyrka inne i människokroppen. Fokus bör därför sättas på det vertikala fältets storlek och inte på det ibland (p g a höga horisontalfält) förstärkta totalfältet.

Beräkningar visar att den magnetiska flödestätheten normalt ej överskrider insatsvärdet på $500 \text{ }\mu\text{T}$ annat än vid arbete mycket nära strömförande ledare.

Summary

The electric field strength (E-field) and the magnetic flux density (B-field) have been studied in air-insulated substations for 70 – 420 kV, with the intention to describe the fields in the working environment. Both ordinary inspections from ground level and more planned working activities, like live working have been studied. The distances between live conductors and the worker have been related to the distances to the outer limit of the live working zone respectively the outer limit of the vicinity zone.

Measured and calculated values have been related to the existing guidelines for exposure. The "Guidelines" from ICNIRP, published in 1998, are under revision but a draft version was published in 2009. The assessments have therefore been based on the new version, but with guidance of the older one. There is a distinction between Basic restrictions and Reference levels for exposure. The first ones are based on established health effects, while the later ones are coupled to the Basic restrictions by physical relations. The basic restriction has been expressed as a current density in the human body, with a maximum level for workers of 10 mA/m² at 50 Hz. The new version uses the internal electric field (in situ) as basic restriction, with the limit 100 mV/m for workers and at 50 Hz. The Reference levels are the same in both versions; 10 kV/m and 500 µT for workers and at 50 Hz.

The field levels have been calculated with both analytical and numerical methods. The analytical ones are often faster but only limited models with cylindrical conductors can be used. The numerical methods can handle more complex models but the input of geometrical data can take a long time. In some cases the calculated results have been compared with measured values, with quite different result. The electric field is often distorted in the vicinity of grounded objects and high horizontal field components may result in rather large differences between measured and calculated values.

The calculations and the measurements can be summarized as follows:

400 kV: >20 kV/m close to grounded frames etc. At longer distances from frames >15 kV/m in older substations and about 12 kV/m in younger ones. 15-45 kV/m at the outer limit of the live working zone.

220 kV: The calculated max. value at 2 m height and at some distance from frames is about 15 kV/m. 15-20 kV/m at the limit of the live working zone.

130 kV: The calculated max. value at 2 m height and at some distance from frames is about 5 kV/m. 15-20 kV/m at the limit of the live working zone.

70 kV: The calculated max. value at 2 m height and at some distance from frames is about 5 kV/m. Approx. 15kV/m at the limit of the live working zone.

Grounded frames etc. will have an influence on the level and the direction of the E-field, but it is the vertical component that is most important for the current density and the in situ electric field. Attention should therefore be put more on the level of the vertical field component and not as much on the total field level, that can be increased by large horizontal field components.

Calculations of the magnetic field levels close to simplified models have shown that the flux density will not exceed the reference level of 500 µT others than at work very close to current carrying conductors.

Innehåll

1	Inledning	1
2	Litteraturoversikt	3
3	Gränsvärden och riktvärden för exponering	9
4	Arbete och avstånd	21
4.1	Arbete	21
4.2	Riskområde och närområde	21
4.3	Icke elektriskt arbete, Arbete Nära Spänning och Särskilda arbeten	24
4.4	Arbete Med Spänning	24
4.5	Arbetsområde och avstånd vid olika typer av arbete	24
5	Ställverk - beräkningsförutsättningar	29
5.1	70 kV av lågbygd typ	29
5.2	130 kV av lågbygd typ	30
5.3	220 kV av lågbygd typ	30
5.4	420 kV av äldre typ	31
5.5	420 kV av senare typ	31
6	Beräkningsmetoder	33
6.1	Analytiska beräkningar	33
6.2	Numeriska beräkningar	34
7	Beräkningar och resultat	37
7.1	Elektrisk fältstyrka	37
7.1.1	Fältstyrkan 1 – 2 m ovan mark i ett enkelt 420 kV ställverk	37
7.1.2	Fältstyrkan i icke spänningssatta fack	50
7.1.3	Fältstyrkan nära spänningssatta ledare	50
7.1.4	Elektrisk fältstyrka i ett 400 kV ställverk av äldre konstruktion ..	52
7.1.5	Elektrisk fältstyrka vid 420 kV i korthet	55
7.1.6	Elektrisk fältstyrka i ett förenklat 220 kV ställverk	56
7.1.7	Elektrisk fältstyrka i ett förenklat 130 kV ställverk	60
7.1.8	Elektrisk fältstyrka i ett förenklat 70 kV ställverk	63
7.2	Magnetisk flödestäthet	67
8	Mätningar och bedömning mot beräknade värden	73
8.1	Instrument	73
8.2	Mätning i ett 420 kV ställverk av senare konstruktion	74
8.3	Mätning i ett 220 kV ställverk	82
8.4	Mätning i ett 420 kV ställverk av äldre konstruktion	84
8.5	Mätning i ett 130 kV ställverk	87
9	Exponering för horisontella fältkomponenter	91
10	Slutsatser och rekommendationer för arbete i höga fält	103
11	Referenser	107

1 Inledning

Denna rapport om fält i ställverksmiljöer är en direkt fortsättning på en tidigare rapport om fält i miljön runt luftledningar för 70 – 400 kV [1]. De två rapporterna kan läsas var för sig, men det innebär också att det finns ett flertal gemensamma avsnitt.

Rapporten om luftledningar skrevs under en period då det rådde viss osäkerhet beträffande de internationella riktlinjerna för exponering för elektriska och magnetiska fält. EU's EMF-direktiv [2], publicerat 2004, senare-lades på hösten 2007 och den internationella strålskyddsorganisationen ICNIRP aviserade att man skulle ge ut nya riktlinjer för exponering, en ersättning för de tidigare riktlinjerna från 1998 [3]. Även om inga detaljer var kända om de nya riktlinjerna, så var den allmänna meningen att innehållet skulle förändras i betydande omfattning. Utgivningen kom dock att dröja och en remissutgåva av de nya riktlinjerna från ICNIRP publicerades först i slutet av juli 2009 [4]. På grund av denna osäkerhet kom den tidigare rapporten om luftledningar att baseras på den då officiella utgåvan av ICNIRP Guidelines från 1998. Föreliggande rapport baseras däremot på remissutgåvan av ICNIRP Guidelines daterad 29 juli 2009, men med vissa hänvisningar till den äldre utgåvan. Skillnaden mellan de två utgåvorna av ICNIRP Guidelines är delvis betydande och därför ägnas ett längre avsnitt åt att beskriva innehållet och dess förankring i litteraturen.

Arbete i ställverk medför oundvikligen, precis som arbete nära luftledningar, att man exponeras för elektriska och magnetiska fält. Fältens storlek beror spänningsnivån, aktuella belastningar, den geometriska uppbyggnaden av ställverket och givetvis av avståndet till skenstråken och eventuellt även till anslutande luftledningar.

Jämfört med luftledningar finns en väsentlig skillnad. Ställverken utgörs av inhägnade områden med begränsat tillträde. Området under luftledningar är däremot öppet för allmänheten och man måste därmed i dessa fall ta hänsyn till den extra säkerhetsmarginal som lagts på motsvarande exponeringsnivåer för arbetstagare.

Precis som i studien för luftledningar har detta arbete framförallt inriktats på den grupp som utför olika typer av underhållsarbete, både med och utan spänning.

Arbetet har inkluderat en litteraturstudie med syfte att inventera vad som tidigare gjorts och vad som är rimligt att göra beträffande beräkningar av fält i den ofta komplexa ställverksmiljön.

Förekommande arbetsuppgifter har analyserats och troliga arbetspositioner har identifierats. De i standarder förekommande begreppen Risk- och Närområde används för att klassificera olika positioner med hänsyn till spänningsförande delar.

De elektriska (E) och magnetiska (B) fälten har beräknats både analytiskt och numeriskt. Båda beräkningssätten har sina för- och nackdelar, precis som i fallet med luftledningar. 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 kan det å andra sidan ta tid att få fram ett användbart resultat.

I luftledningsprojektet visade det sig att jordade strukturer, som stolpben, staglinor etc, kan lokalt öka den elektriska fältstyrkan påtagligt. Det kan visas att så är även fallet i ställverken. Jordade apparatstativ kan visas ha en betydande inverkan på den lokala fältstyrkan. För i synnerhet beräkningar av detta slag ger de numeriska beräkningarna resultat av stort värde.

Rapporten avslutas med en beskrivning av "fältmiljön" i ställverk och några möjligheter att begränsa fält och exponering diskuteras kortfattat.

2 Litteraturöversikt

Fält i ställverksmiljö och de speciella exponeringssituationer som kan uppkomma beskrivs i en tämligen begränsad mängd litteratur. Skillnaden är påtaglig jämför med fält under luftledning. Framförallt de elektriska fälten i olika ställverksmiljöer studerades en del under mitten-senare delen av 70-talet. Det är dock först under det sena 90-talet, då de då nypublicerade riktlinjerna från ICNIRP [3] gav möjlighet till nya studier rörande elektriska och magnetiska fält, som antalet artiklar i vetenskaplig litteratur började öka påtagligt.

I det följande redovisas ett urval artiklar och andra skrifter som behandlar mätningar och effekter av fält i ställverksmiljö. Standarder, riktlinjer och artiklar som berör kopplingen mellan ett yttre elektriskt eller magnetiskt fält och inducerad ström eller fältstyrka inne i kroppen behandlas i det följande avsnitt *3 Gränsvärden och riktvärden för exponering*.

I Transmission Line Reference Book. 345 kV and Above [5], framtagen av EPRI i USA, redovisas både mätningar och beräkningar av E-fält i 345-765 kV ställverk. I boken återfinns även ett antal avsnitt om påverkan av fält på människor och djur, i form av strömmar genom kroppen, momentana gnisturladdningar och kontinuerliga kontaktströmmar. Boken har nu kommit ut i en 3:e upplaga och är fortfarande en rik källa till kunskap om bl a beräkning av det elektriska fältets påverkan på olika föremål. Redovisade nivåer på fält mm är däremot ofta avvikande från situationen i dagens Sverige p g a nationella skillnader i ställverkens layout.

Från ungefär samma tid är en svensk studie presenterad av Karl Gunnar Lövstrand och Sven Bergström i skriftserien Arbete och Hälsa 1980 [6]. Studien omfattande två personalgrupper; stationspersonal som ansvarade för rondning och mindre underhållsarbeten i ett eller flera närliggande ställverk och brytarpersonal som renoverade brytare inom ett större område. Brytarpersonalen arbetade ofta på hög höjd ovanpå stativ och brytare och förmodades var den mer exponerade gruppen. Inför den omfattande huvudstudien tog man fram både ett "vanligt" fältmätinstrument och en dosimeter för att mäta den elektriska fältstyrkan. Dosimetern bestod av en ledande hjälm och en bärbar utrustning som loggade den ström som inducerades i hjälmen. Genom kalibrering kunde strömmen räknas om till aktuell fältstyrka. Man tog även fram en mätdocka för att kunna bestämma storleken och fördelningen av de strömmar som induceras i kroppen på en person som befinner sig i ett elektriskt växelfält. För att få induktionsvillkor liknande människans, målades dockan med halvledande färg. Därtill var dockans olika delar isolerade från varandra och strömmen mellan dessa kunde mätas med inbyggda amperemätare.

En mer allmän kartläggning av fältstyrkan genomfördes både i hög- och lågbyggda 400 kV ställverk och man uppmätte då vanligen 10 - 15 kV/m i den förra gruppen och vanligen 15 - 20 kV/m i den senare gruppen. Den högsta fältstyrkan, 21 kV/m, uppmättes intill vissa fränksiljare.

Dosimetermätningar med personal som rörde sig över stora ytor i ställverk visade att exponeringen under den absoluta huvuddelen av arbetstiden var under 10 kV/m. Arbete i 130 och 220 kV ställverk resulterade inte i någon exponering för fält överstigande 10 kV/m. Vid arbete i 400 kV ställverk uppgick arbetstiden i fält överstigande 10 kV/m till ca 5 % av den totala tiden. Situationen vid rondning visade sig vara liknande. Vid 400 kV utgjorde arbetstiden med fält > 10 kV/m drygt 3 % av tiden och varken i ställverk för 220 eller 70 kV registrerades någon exponering > 10 kV/m. Skillnaden mellan arbete över stora ytor och rondning förklaras med att man vid rondning upphåller sig nära jordade apparatstativ, som verkar skärmande på det elektriska fältet. De motsvarande mätningarna med brytarpersonal gav ett något annat resultat. Vid revision av brytare, som utfördes delvis på hög höjd, registrerades fältstyrkor > 10 kV/m under mellan 20 och 50 % av arbets-tiden.

I en artikel i Electra från 1979 [7] redovisar en annan svensk forskargrupp resultat baserade på ett liknande grundmaterial; 53 personer med mer än fem års erfarenhet från arbete i 400 kV ställverk. Studie var framförallt inriktad på eventuella långtidseffekter av elektriska fält, och man kunde inte finna någon signifikant avvikelse jämfört med en referensgrupp bestående av 53 personer från samma företag men utan exponering.

K G Lövstrands arbeten med elektriska fält följdes av informationsskrift [8] om E-fält, utgiven gemensamt av Lövstrand, verksam vid Institutet för högspänningsforskning i Uppsala, Vattenfall, Sydkraft och Älvkarleby Kraftverk. Skriften behandlar inledningsvis hur människor och föremål som träd och buskar påverkar det elektriska fältet. Fältet nära ledningar och i ställverk beskrivs i ord och bild. Ett avsnitt ägnas åt hur man upptäcker eller kan känna av det elektriska fältet, d v s genom i kroppen inducerad ström och genom gnisturladdningar. Olika händelser beskrivs och kvantifieras genom "Värsta tänkbara fall" och "Sannolika fall". Ett längre avsnitt ägnas åt att förklara hur obehagen med E-fält och framförallt gnisturladdningarna kan undvikas. Jordförbindning av föremål som annars riskerar att ladda upp sig och skärmning av utsatta arbetspositioner nämns som ett par enkla men effektiva lösningar. Först på listan över åtgärder kommer givetvis att försöka undvika fälten överhuvudtaget och som ett sista alternativ, när inga andra möjligheter återstår, att använda skärmande klädsel. Detta är en utmärkt skrift då den ger bra och tydliga förklaringar till olika fenomen och visar på möjligheter att reducera fält.

Till den senare gruppen litteratur, från slutet av 90-talet och framåt hör bl a ett par ISH-artiklar från forskare vid universitetet i Tampere, Finland. En mätning på 1 meters höjd i ett 400 kV ställverk [9] gav värden på det magnetiska fältet varierande mellan 1,4 och 15,4 μT och på det elektriska fältet mellan 1,5 och 11,2 kV/m. Några mer detaljer om ställverkets layout, belastningar etc ges inte i artikeln. En motsvarande mätning i ett 110/20 kV ställverk gav magnetfältsvärden varierande emellan 0,4 och 18,6 μT och elektriskt fält varierande mellan 0,02 och 4,6 kV/m. Källan för det magnetiska fältet var i huvudsak skenan till en 20 kV transformator, belastad med 703 A. Avståndet mellan mätpunkten 18,6 μT och skenan var 1,8 m. Den huvud-sakliga källan för det elektriska fältet var en 110 kV skena. I en separat artikel publicerad vid samma ISH-symposium 1999 [10] redovisades mer detaljer om mätningar av den elektriska fältstyrkan i ett 400 kV ställverk. Man har mätt fältstyrkan på 1 meters höjd och med 2 meters punktavstånd längs fyra linjer täckande

ett 400 kV ställverk, totalt 251 mätpunkter. Spänningen på samlingsskenorna varierande under mätperioden mellan 402,5 och 405,3 kV. Maximal uppmätt fältstyrka var 9,9 kV/m och fältstyrkans medelvärde längs linjerna varierade mellan 5,7 och 7,7 kV/m. Redovisade kurvor över fältstyrkan uppvisar tydliga toppar motsvarande ytterfaserna i facken och framförallt där de samverkar med inkommande linjer.

Vid ISH 2001 publicerades en japansk artikel [11] med mätningar och motsvarande beräkningar av den magnetiska flödestätheten i ett 500/275 kV ställverk. Författarna visar att det råder god samstämmighet mellan uppmätta och beräknade värden och att den maximala flödestätheten uppgår till ungefär 20 μT inom 275 kV delen och till betydligt lägre nivåer inom 500 kV delen.

Forskargruppen från Tampere var också aktiva vid en IEEE-konferens 2002 och publicerade flera artiklar, bl a en om fält invid ett gasisolerat ställverk (GIS) för 110 kV [12]. Uppmätta värden på det elektriska fältet är genomgående mycket låga, väl under 0,1 kV/m, på grund av att alla ledare är väl skärmade. Den magnetiska flödestätheten varierar betydligt mer, från $<0,1 \mu\text{T}$ till ett enstaka mätvärde $>1000 \mu\text{T}$. Sju montörer vid GIS-ställverket försågs med magnetfältsdosimetrar som loggade fältet under 24 timmar, vilket visade att fältet uppgick till maximalt 1 μT under ca 50 % av tiden och översteg 5 μT under endast 0,1 - 7 % av tiden. Med momentanvisande instrument uppmättes magnetfältet i hela anläggningen på 1 meters höjd och det högsta värdet kunde då uppmätas i en tunnel med anslutande kablar. Maxvärdet vid dosimetermätning på $>1000 \mu\text{T}$ kan möjligen förklaras av att den aktuella montören kommit mycket nära någon av de anslutande kablarna med sin dosimeter. I en andra artikel vid samma IEEE-konferens publicerade man en artikel [13] om mätningar av fält innanför och utanför det avgränsade området till ett 400/110 kV ställverk, det senare med anledning av lägre exponeringsgränser för allmänheten. Inom ställverksområdet uppmättes som högst ca 18 μT respektive ca 8 kV/m, på 1 meters höjd och med fasledarna ca 8,5 m ovan mark. Utanför ställverksområdet var givetvis nivåerna betydligt lägre. Det magnetiska fältet uppgick som högst till ca 2 μT och det elektriska fältet till ca 1 kV/m. En tredje artikel av samma grupp av författare [14] ägnades åt frågan vilken strömtäthet i kroppen som dessa uppmätta fält-nivåer motsvarar. Man utnyttjar enkla uttryck för strömtätheten i en s k prolatt sfäroid (rotationsellipsoid) orsakad av ett yttre elektriskt fält och ett yttre magnetfält och adderar sedan dessa två strömkomponenter, dock utan hän-syn till riktning eller fasläge. Med aktuella värden på fälten under en 400 kV ledning, fås en total strömtäthet varierande mellan 0,2 och 0,8 mA/m^2 och för motsvarande i ett 400 kV ställverk fås mellan 0,37 och 1,9 mA/m^2 .

Tre år senare, vid ISH-konferansen 2005 i Beijing, publicerades bl a en kinesisk artikel [15] med mätningar av både elektriska fältstyrka och magnetisk flödestäthet i ett ställverk för 500/220 kV. Båda storheterna mättes på 1 meters höjd. Inom 500 kV delen mättes fältstyrkor i storleksordningen 5 - 7,5 kV/m och inom 220 kV delen 1 - 4 kV/m. Den magnetiska fältstyrkan varierade mellan 0,18 - 9,7 A/m (motsvarande 0,2 - 12 μT) inom själva ställverksområdet och upp mot 280 A/m (motsvarande 350 μT) nära en grupp reaktorer. Tyvärr lämnar inte artikeln någon mer detaljerad information om mätpunkternas placering i förhållande till skenor och apparater.

2006 publicerades ännu en artikel från Finland om mätning av elektriska fält i ställverksmiljö [16]. Mätsystemet bestod här av en folieklädd hjälm med ledande visir och en amperemätare kopplad mellan dessa och jord. (Jmf "dosimeterhjälm" i ref [6]) Med systemet blev det alltså möjligt att direkt mäta den ström som i normalfallet passerar från huvudet och ner genom halstvärnsnittet. Med antagande om ett rimligt halstvärnsnitt (omkrets 40 cm) och en homogen konduktivitetsfördelning i tvärsnittet, blev det också möjligt att beräkna strömtätheten i detta kritiska snitt. Genomförda mätningar i ett ställverk för 400 kV visade på en strömtäthet i halstvärnsnittet på mellan 0,1 och 6,8 mA/m². Arbete på marknivå resulterade aldrig i högre strömtäthet än 4,8 mA/m², medan arbete på stege eller plattform kunde ge upphov till något högre värden.

Vid en Cigré-konferens 2008 presenterades en undersökning från Rumänien. I och med landets inträde i den Europeiska Unionen 2007, blev det aktuellt att se över en rad olika harmoniseringsdokument, bl a EUs EMF-direktiv och den här aktuella undersökningen [17] syftade till att inventera och beskriva aktuella fältnivåer i ett 400/220 kV ställverk. Man har systematiskt och i drygt 3 000 punkter mätt både B- och E-fält på 1,7 meters höjd. Magnetfältet är tämligen lågt, aldrig över 4 A/m (5 µT), dvs långt under den av EU föreslagna maxnivån på 500 µT. Det elektriska fältet är däremot betydligt högre. I princip hela det område som täcks av 400 kV ställverket ligger över 10 kV/m och lokalt i några punkter är fältet drygt 20 kV/m. I 220 kV delen är det endast ett fåtal punkter som överstiger 10 kV/m. De allra högsta värdena i 400 kV delen sammanfaller med brytare och frånskiljare, som medför att spänningen leds ner till endast 6,5 m ovan mark.

Från Grekland rapporteras i en artikel från 2009 om mätning av elektriska och magnetiska fält i ett 150/20 kV ställverk [18]. Fält har mätts i totalt 300 punkter och på tre höjder; mark-/golvnivå, på 1 meters höjd och på 1,8 meters höjd. Höga magnetfältsnivåer, drygt 700 µT, uppmättes mycket nära anslutningarna till ett par luftreaktorer men i övrigt inom ställverksområdet ligger de högsta värdena inom området 20 - 60 µT. Den högsta elektriska fältstyrkan, på 4,3 kV/m, uppmättes på högspänningssidan (150 kV) av en transformator.

Avslutningsvis kan nämnas tre svenska examensarbeten som behandlat fält i ställverksmiljö och direkta effekter av elektriska fält.

I det första examensarbetet av Johanna Fracke och Jenny Åke har elektriska och magnetiska fält studerats i en äldre 400 kV anläggning (Stenkullen)[19]. Mätningen av den magnetiska flödestätheten visade på värden över 100 µT, men dessa förhållandevis höga värden kunde förklaras med närheten till strömförande jordningar av apparatstativ. Dessa höga nivåer bör därför vara mycket lokala. Värden i storleksordningen 40 - 50 µT synes däremot vara mer representativa inom ställverket. Den elektriska fältstyrkan uppmättes frekvent till över 10 kV/m och mer lokalt till även över 15 kV/m. Det högsta uppmätta värdet på närmare 18 kV/m i en mätpunkt kan förklaras med samverkan mellan samma faser i en lågt belägen skena och i ett fack

Möjligheten att minska det elektriska fältet i ställverk med hjälp av jordade skärmlinor har studerats i ett examensarbete av Anneli Petterson och Charlotte Österlund [20]. Man redovisar skärminningsförsök och motsvarande beräkningar med olika lindiameter och med olika avstånd mellan skärmlinorna. Gi-

vetvis erhålls bättre skärmverkan om avståndet mellan linorna minskas, men redan avstånd på 0,5 – 1 m ger avsevärd skärmverkan. Vid mätningar inne i en äldre 400 kV anläggning (Stenkullen) uppmättes ett oskärmat elektriskt fält på 13,4 kV/m och med skärmlinor med 1 meters inbördes avstånd ett fält på 5,1 kV/m. Linorna var i detta fall fästade på 3 meters höjd i en trästomme på 5 x 10 m.

I ett arbete av Jonas Cedergren [21] redovisas en rad mätningar av kontaktströmmar och gnisturladdningar orsakade av höga elektriska fält i ställverksmiljö. För de kontinuerliga 50 Hz kontaktströmmarna kan Cedergren visa på värden upp mot 0,18 mA vid kontakt mellan människa och jordat föremål och för kontakt mellan en skåpbil och jord på värden upp mot 1,17 mA. Gnisturladdningar kan upplevas som mer besvärande och för dessa redovisas toppvärden på upp till 1,75 A, med en varaktighet på ca 2 µsek.

Gnisturladdningar och kontaktströmmar behandlas också i en Elforsk rapport från 2007 [22]. I rapporten finns beskrivet hur människor reagerar på dessa fenomen och vilken storlek som dessa strömmar kan anta under olika förhållanden. I rapporten visas på stora spann mellan de teoretiskt högsta värdena på kontaktström respektive gnisturladdning och de som uppträder under normala förhållanden. För höga strömmar krävs att den kropp som skall laddas upp är isolerad från jord, medan vanligen medger skor, olika typer av däck etc en viss urladdning och därmed mindre obehag vid kontakt.

Sammanfattningsvis visar detta mycket begränsade urval av den tillgängliga litteraturen över mätningar och beräkningar av fält i ställverksmiljö på två tydliga förhållanden:

- Den magnetiska flödestätheten är förhållandevis låg, vanligen under 50 µT och endast mycket lokalt över 100 µT.
- Den elektriska fältstyrkan är förhållandevis hög. Lokalt kan denna nå över 10 kV/m och värden i storleksordningen 20 kV/m synes kunna förekomma i vart fall i äldre 400 kV anläggningar, med stora fasavstånd och skenor på låg höjd. Vid arbete på marknivå i ställverk för 70 – 220 kV, bör däremot E-fältet mycket sällan överstiga 10 kV/m.

3 Gränsvärden och riktvärden för exponering

I detta avsnitt ges en översikt av nu aktuella gräns- och riktvärden för exponering, liksom något om tidigare synsätt. Även om sambandet mellan yttre fält och i kroppen inducerade storheter som strömtäthet och inre fältstyrka, ges här en kortare beskrivning.

Det har redan i inledningen till detta arbete nämnts att det internationella regelverket för exponering för lågfrekventa elektriska och magnetiska fält är under omarbetning och därmed att det nu våren 2010 saknas fastställda gränsvärden. Det förslag till nya "guidelines" som den internationella strål-skyddsorganisationen ICNIRP presenterade den 29 juli 2009 [4] är nu våren 2010 det närmaste en internationell standard som det går att komma. Remisstiden för förslaget löpte ut den 31 oktober, men torde ändå dröja en tid innan en fastställd utgåva av ICNIRP Guidelines kan publiceras. I väntan på detta får därför bedömningar av fält och exponering relateras till denna draf-tutgåva av ICNIRP Guidelines daterad 29 juli 2009.

I det följande ges en beskrivning av förslaget från ICNIRP, men först en kortare genomgång av den tidigare utgåvan från 1998 och de EU-dokument och den svenska föreskrift som baserats på det tidigare ICNIRP-dokumentet.

Ett flertal standarder för mätning och för bedömning av olika exponeringssituationer har publicerats inom detta område och flera av dem bygger på ICNIRP Guidelines från 1998. Det är ännu oklart om dessa standarder kommer att omarbetas eller man eventuellt väljer att ta fram helt nya dokument.

ICNIRP Guidelines 1998 omfattar hela frekvensområdet upp till 300 GHz, men i det följande beaktas bara området upp till 100 kHz. Riktlinjerna syftar till att skydda mot omedelbara effekter av fält, frågan om eventuella lång-tidseffekter behandlas alltså inte. I dokumentet definieras två typer av riktlin-jer – Basic restrictions och Reference levels. Basic restrictions eller gränsvär-den baseras direkt på erkänd påverkan på människokroppen och uttrycks i det lägre frekvensområdet som en strömtäthet (mA/m^2) inne i kroppen. Den-na strömtäthet kan dock inte mätas direkt. Reference levels eller insatsvärden är direkt mätbara storheter, ex vis elektrisk fältstyrka (kV/m) och magnetisk flödestäthet (μT). För det lägre frekvensområdet har dessa Reference levels beräknats utifrån Basic restrictions med hjälp av förhållande-vis enkla mate-matiska modeller. Relationen mellan Reference levels och Basic restrictions är sådan att om aktuell exponering inte överskrider Reference levels, så överskrids inte heller Basic restrictions. Däremot, om Reference levels överskrids, så behöver ej nödvändigtvis Basic restrictions överskridas. Konse-kvensen av detta blir att om Reference levels överskrids, så är det nödvändigt att kontrollera om även Basic restrictions överskrids.

I sammanfattningen över biologiska och epidemiologiska studier för frekvens-området upp till 100 kHz sägs bl a:

"Laboratory studies on cellular and animal systems have found no established effects of low-frequency fields that are indicative of adverse health effects when induced current density is at or below 10 mA/m². At higher levels of induced current density (10-100 mA/m²), more significant tissue effects have been consistently observed, such as functional changes in the nervous system and other tissue effects."

"Measurement of biological responses in laboratory studies and in volunteers has provided little indication of adverse effects of low-frequency fields at levels to which people are commonly exposed. A threshold current density of 10 mA/m² at frequencies up to 1 kHz has been estimated for minor effects on nervous system functions. Among volunteers, the most consistent effects of exposure are the appearance of visual phosphenes and a minor reduction in heart rate during or immediately after exposure to ELF fields, but there is no evidence that these transient effects are associated with any long-term health risk."

Följande värden gäller för Basic restrictions eller gränsvärden:

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 Hz - 4 Hz	40/f	8/f
f = 4 Hz - 1 kHz	10	2
f = 1 kHz - 400 kHz	f/100	f/500

Tabell 1. Basic restrictions eller gränsvärden, ICNIRP 1998 [3].

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 av implanterat.

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. Referensnivåer eller insatsvärden för arbetstagare, ICNIRP 1998 [3].

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

Tabell 3. Referensnivåer eller insatsvärden för allmänheten, ICNIRP 1998 [3].

I ICNIRP Guidelines 1998 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 in-direct 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.

ICNIRP Guidelines 1998 kom att ligga till grund för två EU-dokument och för olika nationella föreskrifter, bl a en svensk.

Det första EU-dokumentet är en Rådets rekommendation daterad den 12 juli 1999 om begränsning av allmänhetens exponering för elektromagnetiska fält 0 Hz–300 GHz [23]. Begränsningarna i denna innehåller Allmänhetens värden i ICNIRP 1998, med tillägg av värden för 0 - 1 Hz. Basic restrictions eller gränsvärden kallas i detta dokument för Grundläggande begränsning. Denna Rådets rekommendation kom att ligga till grund för den svenska föreskriften SSI FS 2002:3 Statens strålskyddsinstituts allmänna råd om begränsning av allmänhetens exponering för elektromagnetiska fält [24]. Det sägs i denna föreskrift att fält som medför att de grundläggande begränsningarna över-skrids, inte bör förekomma i något område som allmänheten vistas i. Likaså

sågs att fält överstigande referensnivåerna inte *bör* förekomma i något område som allmänheten vistas i. Det sägs också att de allmänna råden skall inte tillämpas på arbetstagare som exponeras i sin yrkesroll. För sådan exponering gäller i stället föreskrifter från Arbetsmiljöverket.

Den 29 april 2004 antogs ett EU-direktiv [2] med minimikrav för att skydda arbetstagares mot sådana hälso- och säkerhetsrisker som uppstår eller kan uppstå vid exponering för elektromagnetiska fält under arbetet (0 Hz till 300 GHz). Direktivet kom att helt baseras på ICNIRP's värden för arbetstagare och kompletterades bl a med ett avsnitt om arbetsgivarens skyldigheter. I direktivets stadgades att medlemsländerna senast fyra år efter dess offentliggörande skulle ikraftsätta sådana bestämmelser som ansågs nödvändiga för att följa direktivet.

EU-direktivet kom att utsättas för mycket hård kritik, bl a från den medicintekniska sidan, och som ett resultat därav senarelades införandetidpunkten för EU-direktivet med fyra år, fram till den 30 april 2012 [25].

Viss kritik kom också att riktas mot det grundläggande dokumentet – ICNIRP Guidelines från 1998 – och olika tänkbara förändringar i en ny utgåva hade redan hunnit diskuteras en längre tid när en ny draft till ICNIRP Guidelines publicerades den 29 juli 2009 [4]. Den nya utgåvan omfattar bara ELF-området d v s frekvensområdet 1 Hz - 100 kHz och skiljer sig även i övrigt på vissa punkter från den tidigare. I den nya utgåvan har man som tidigare bara beaktat erkända och omedelbara effekter av elektriska och magnetiska fält. Obehag i samband med gnisturladdningar är en sådan erkänd effekt. T ex en gnisturladdning från människa till jord kan upplevas som smärtsam för 7 % av en grupp försökspersoner som vistas i ett elektriskt fält på 5 kV/m. Ökar fältstyrkan till 10 kV/m, ökar också andelen som upplever smärta vid urladdning till 50 %. En annan diskuterad effekt är stimulans av det centrala nervsystemet och man nämner i den nya utgåvan en miniminivå för sådan stimulans på 100 mV/m, räknat som lokal elektrisk fältstyrka i kroppen (in situ fältstyrka). Mest etablerad är den påverkan på det visuella systemet som betecknas fosfener och som anses kunna uppträda vid en lokal in situ fältstyrka från 50 till 100 mV/m. Precis som i den tidigare utgåvan, baseras angivna gränsvärden enbart på erkända omedelbara effekter och inte på några eventuella långtidseffekter, som olika former av cancer eller neuro-degenerativa sjukdomar.

Ett av de viktigaste avsnitten i den nya utgåvan handlar om dosimetri, d v s sambandet mellan ett yttre elektriskt eller magnetisk fält och en därav beroende storhet inne i kroppens vävnader. I denna nya utgåva uttrycks den inre storheten som en elektrisk fältstyrka in situ (i kroppen). Detta uttrycks-sätt är nytt för ICNIRP Guidelines men ingalunda inom den vetenskapliga litteraturen i övrigt. Under 1998 publicerades tre artiklar av en forskargrupp vid University of Victoria, Kanada, där begreppen strömtäthet och elektrisk fältstyrka in situ användes parallellt. I april 1998 publicerades en artikel i IEEE Transactions on Power Delivery [26] med titeln High-Resolution Organ Dosimetry for Human Exposure to Low-Frequency Electric Fields. Denna följdes i maj av en artikel i IEEE Transactions on Magnetism [27] med titeln High-Resolution Organ Dosimetry for Human Exposure to Low-Frequency Magnetic Fields och i maj kom även en artikel i Physics in Medicine and Biology [28] med titeln

Effects of skeletal muscle anisotropy under 60 Hz uniform magnetic field exposure.

Det visas i dessa artiklar att båda storheterna är användbara, men att fältstyrkan in situ är mindre känslig för kroppens lokala konduktivitetsvariationer. Resultatet blir därigenom mer stabilt och de stora skillnader som strömtätheten kan uppvisa blir betydligt mindre påtagliga med fältstyrkan in situ som mätstorhet. Beräkningsmässigt är det givetvis ingen större skillnad då den ena storheten kan beräknas ur den andra med hjälp av Ohms lag. Dessa artiklar kom sedan att följas av allt fler som ifrågasatte valet av strömtäthet som en lämplig storhet och övergången till fältstyrka in situ får därför betecknas som ett väl genomarbetat och närmast naturligt val.

Oavsett valet av mätstorhet, strömtäthet eller fältstyrka in situ, är sambandet mellan yttre fält och inre storhet en mycket svår fråga. Tidiga beräkningar, fram till mitten av 90-talet, utnyttjade mycket enkla geometriska modeller. Under den andra hälften av 90-talet gavs så möjlighet att utnyttja detaljerade modeller med kroppens organ modellerade med rimlig form och konduktivitet. De tre artiklarna ovan från 1998 bygger alla på modellen UVic, som är uppbyggd av 1 736 873 kubiska celler med sidlängden 3,6 mm. I den nya utgåvan av ICNIRP Guidelines pekar man ut tre artiklar från senare år som ger resultat från beräkningar med modeller med en upplösning bättre än 4 mm.

Den första av de tre och kanske den mest intressanta, är en artikel från 2005 av Peter Dimbylow med titeln 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 [29]. I artikeln redovisas resultat från beräkningar med två modeller, dels den kvinnliga modellen NAOMI (1,63 m/60 kg) och dels den manliga NORMAN (1,76 m/73 kg). Båda modellerna är uppbyggda av kubiska celler med ungefär 2 mm sida. NAOMI är uppbyggd av ungefär 7,75 miljoner celler fördelade på 41 organ/vävnader med fastställd konduktivitet. I den något större NORMAN finns ungefär 8,3 miljoner celler fördelade över 38 olika organ/ vävnader. De båda modellerna har exponerats för ett yttre homogent fält och inre storheter har sedan beräknats. I samtliga beräkningsfall har modellerna varit upprätt stående, i vissa fall med fötterna i kontakt med jord och i andra fall isolerade från jord. Det elektriska fältet har alltid varit riktat vertikalt, längs med kroppen, medan det magnetiska fältet har varit riktat vertikalt, från sidan och bröst-rygg. För in situ fältstyrkan redovisas den 99th percentilen, d v s ett värde som överskrider endast i 1 % av ingående beräkningsceller i organet samt i vissa fall även medelvärde och den maximala fältstyrkan i respektive organ. Orsaken till att använda den 99:e percentilen framför det maximala värdet, är den att det senare kan vara kraftigt påverkat av diverse ofullkomligheter i den matematiska behandlingen.

I Tabell 4 återges Dimbylows beräknade värden för NAOMI vid 50 Hz. Värden har beräknats för ryggmärgen (spinal cord), för hjärnans vita substans (white matter), för hjärnans grå substans (grey matter) och för näthinnan (retina). Vid beräkning med det elektriska fältet är modellen jordad, vilket ger upphov till högst fält in situ. I detta fall fås högst fältstyrka i ryggmärgen; 2,92 mV/m vid ett yttre fält av 1 kV/m. Vid motsvarande beräkning med ett magnetiskt

fält, riktat från sida-sida, fås högst fältstyrka i hjärnans vita substans; 31,4 mV/m vid 1 mT.

Tabell 5 återger resultatet vid beräkningar med både NAOMI och NORMAN och med ett magnetiskt fält riktat bröst-rygg (AP), sida-sida (LAT) och vertikalt (top). Beroende på fältets riktning fås högsta fältstyrka i olika organ. Mest kritisk är exponering sida-sida, med en fältstyrka in situ på 48,6 mV/m vid 1 mT.

Organ	Applied electric field grounded conditions (mV/m per kV/m)			Applied magnetic field from side to side (LAT) (mV/m per mT)		
	Mean	99 th percentile	Maximum	Mean	99 th percentile	Maximum
Spinal cord	1,16	2,92	4,88	8,90	27,0	53,0
White matter	0,781	2,02	6,13	10,1	31,4	82,5
Grey matter	0,474	1,62	4,85	8,04	30,2	74,8
Retina	0,314	0,552	0,582	6,69	13,5	15,1

Tabell 4. Inducerad fältstyrka i NAOMI vid 50 Hz. Återgiven från ref [29], Table 5. Homogent fält. Fetstil anger maxvärden.

Geometry	Electric field for 99th percentile voxel value in mV/m per mT		
	Brain	Spinal cord	Retina
NAOMI, AP (front-back)	25,7	17,7	6,98
NORMAN, AP (front-back)	30,7	29,7	7,05
NAOMI, LAT (side-side)	31,4	27,0	13,5
NORMAN, LAT (side-side)	33,0	48,6	14,6
NAOMI, TOP (vertical)	25,1	8,60	6,90
NORMAN, TOP (vertical)	22,1	23,0	10,2

Tabell 5. Elektrisk fältstyrka in situ uttryckt som 99:e percentil och vid ett yttre magnetiskt fält av 1 mT. Återgiven från ref [29], Table 6. Homogent fält. Fetstil anger maxvärden.

Exponering för ett yttre elektriskt fält redovisas i Tabell 6. Modellerna är både jordade via fötterna (GRO) och isolerade från jord (ISO). Högst fältstyrka in situ fås med en NORMAN som har fötterna i kontakt med marken; 3,42 mV/m vid 1 kV/m.

Geometry	Electric field for 99th percentile voxel value in mV/m per kV/m		
	Brain	Spinal cord	Retina
NAOMI, GRO	2,02	2,92	0,552
NORMAN, GRO	1,65	3,42	0,514
NAOMI, ISO	1,22	1,40	0,336
NORMAN, ISO	0,811	1,63	0,262

Tabell 6. Elektrisk fältstyrka in situ uttryckt som 99:e percentil och vid ett yttre elektriskt fält av 1 kV/m. Återgiven från ref [29], Table 7. Homogent fält. Fetstil anger maxvärden.

Den andra av de utpekade artiklarna publicerades i Health Physics 2007 och har Bahr, Bolz och Hennes som författare [30]. För beräkningarna har man nyttjat en modell med 40 olika organ/vävnader och med en geometrisk upplösning av 1x1x1 mm. Vissa beräkningar har även upprepats med en "nerskalad" modell motsvarande ett 5-årigt barn (109 cm). De resultat som presenteras är fältstyrkans maxvärden i respektive organ. Stor vikt ägnas att jämföra de numeriskt beräknade resultaten med analytiska beräkningar och med motsvarande resultaten från andra forskare.

I Tabell 7 visas resultat från en beräkning med ett jordad modell i ett vertikalt och homogent 50 Hz elektriskt fält (E_z) och med en modell exponerad för ett 50 Hz magnetfält riktat bröst-rygg.

Exposure field	E (mV/m)
$E_z = 5$ kV/m	12,8 (Grey matter)
$E_z = 5$ kV/m	8,1 (White matter)
$H_y = 80$ A/m, $B = 100$ μ T	2,24 (Grey matter)
$H_y = 80$ A/m, $B = 100$ μ T	2,38 (White matter)

Tabell 7. Beräknad elektrisk fältstyrka, maxvärde i respektive organ. Homogent fält. Jordad modell. Återgiven från ref [30].

Tabell 8 återger resultaten från beräkning av fältstyrkan vid exponering för ett vertikalt 50 Hz elektriskt fält och motsvarande för ett magnetiskt fält riktat bröst-rygg återges i Tabell 9. I båda tabellerna finns en jämförande beräkning med en modell motsvarande ett 5-årigt barn.

Tissue	E (mV/m), maximum value at $E_z = 5 \text{ kV/m}$, 50 Hz	
	Adult (187 cm)	Child (109 cm)
Grey matter	8,91	8,57
White matter	5,69	5,48

Tabell 8. Elektrisk fältstyrka vid 5 kV/m, 50 Hz. Homogent fält. Ojordad modell. Återgiven från ref [30].

Tissue	E (mV/m), maximum value at $H_y = 80 \text{ A/m}$, 50 Hz	
	Adult (187 cm)	Child (109 cm)
Grey matter	2,23	1,3
White matter	2,38	1,38

Tabell 9. Elektrisk fältstyrka vid $H = 80 \text{ A/m}$ ($B = 100 \text{ }\mu\text{T}$), 50 Hz. Homogent fält. Återgiven från ref [30].

I den tredje artikeln, av Akimasa Hirata m fl, publicerad i Radiation Protection Dosimetry 2009 [31], ges resultat från beräkningar med modeller motsvarande en japansk man och en japansk kvinna. Modellerna är mindre än NORMAN och NAOMI, "mannen" TARO är 1,728 m lång och väger 65,0 kg och "kvinnan" HANAKO är 1,6 m lång och väger 53,0 kg. Modellerna har exponerats för ett homogent 50 Hz magnetiskt fält riktat bröst-rygg, sida-sida respektive vertikalt och fältstyrkan in situ har beräknats och uttryckts som maxvärden och 99:e percentil. Resultatet visar i stort sett genomgående på lägre in situ fältstyrkor hos de japanska modellerna jämfört med NORMAN och NAOMI. Skillnaden förklaras med att de japanska modellerna har mindre omkrets (tunnare kroppsform) och till viss del med detaljskillnader mellan modellerna.

Materialet från Dimbylow och Bahr m fl kan sammanfattas enligt följande:

Beräknade in situ fältstyrkor avseende exponering för homogena fält finns för vertikala elektriska fält, jordade och ojordade modeller. Med en jordad modell fås högre in situ fältstyrka, men effekten av kroppslängden (NAOMI jfm NORMAN) är inte lika given utan varierar från organ till organ. Resultaten avseende exponering för homogena magnetfält, visar att högst värden i kritiska organ fås vid exponering för ett fält riktat sida-sida. I tabellerna 10 och 11 ges en översikt av materialet.

Yttre fält	Fältstyrka in situ (mV/m)		Kommentar
	Jordad modell	Ojordad modell	
Elektriskt fält, 1 kV/m, 50 Hz, homogent, vertikalt	3,42	1,63	Dimbylow [29]. NORMAN. Värde för ryggmärgen, 99 th percentil
	2,56	1,78	Bahr [30]. Maxvärde för hjärnans grå substans.

Tabell 10. Översikt elektriskt fält och in situ fältstyrka.

Yttre fält	Fältstyrka in situ (mV/m)			Kommentar
	Exponering bröst-rygg	Exponering sida-sida	Exponering vertikalt	
Magnetiskt fält, 1 mT, 50 Hz, homogent	30,7			Dimbylow [29]. NORMAN. Värde för hjärnan. 99 th percentil
		48,6		Dimbylow [29]. NORMAN. Värde för ryggmärgen. 99 th percentil
			25,1	Dimbylow [29]. NA-OMI. Värde för hjärnan. 99 th percentil
	23,8			Bahr [30]. Maxvärde för hjärnans vita substans.

Tabell 11. Översikt magnetiskt fält och in situ fältstyrka.

I den nya draftutgåvan av ICNIRP Guidelines sammanfattas dessa litteraturuppgifter enligt följande:

Elektriskt fält 50 Hz, 1 kV/m: max in situ fältstyrka 3 - 4 mV/m.

Magnetiskt fält 50 Hz, 1 mT: max in situ fältstyrka 50 - 80 mV/m.

Angivna 3 - 4 mV/m per kV/m kan synas riktigt för en modell eller människa i kontakt med jord, men 2 mV/m per kV/m borde likväl kunna anses vara rimligt för en kropp isolerad från jord. Möjligen kan detta komma att diskuteras vidare i den slutgiltiga versionen av ICNIRP Guidelines. Den övre gränsen för

intervallet för magnetiskt fält är inte lika självklar. 80 mV/m per mT ligger väl över redovisade 99:e percentiler. Möjligen har man här valt att inkludera även maxvärden från Dimbylow (82,5 mV/m för NAOMI, white matter), men förhoppningsvis får detta en bättre förklaring i den slutgiltiga utgåvan.

I avvaktan på den slutgiltiga utgåvan är det dock de angivna intervallen som gäller och huruvida hänsyn får tas till jordade eller ojordade förhållanden eller till vilken riktning det magnetiska fältet har är ännu en öppen fråga.

I den nya utgåvan används begreppen Basic restrictions och Reference levels precis som tidigare. Basic restrictions baseras på direkt och erkänd påverkan på det centrala nervsystemet och Reference levels utgörs av motsvarande mätbara storheter.

Vid beräkning av in situ fältstyrkan kommer resultatet att vara kraftigt beroende av upplösningen i modellen. Användningen av 99:e percentilen i stället för det absoluta maxvärdet i ett organ är en möjlighet att råda bot på detta problem. I den nya utgåvan av Guidelines har man valt en annan lösning och rekommenderar att in situ fältstyrkan skall räknas som medel-värdet av fältet i en kub med sidan 5 mm.

För Basic restrictions och för personer som exponeras för fält i sitt ordinarie arbete (occupational exposure), inom frekvensområdet 10 Hz – 100 Hz, sägs att den elektriska fältstyrkan skall begränsas till 100 mV/m i vävnad som hör till det centrala nervsystemet. För allmänheten införs en säkerhetsfaktor på 5, vilket ger en Basic restriction på 20 mV/m. Denna lägre nivå motiveras av gruppens varierande ålder, hälsotillstånd och att den i allmänhet är mindre medveten om sin exponering än arbetstagarna.

Grupp	Elektrisk fältstyrka in situ (rms)	
	Arbetstagare (V/m)	Allmänheten (V/m)
Frekvensområde		
Gränsvärde vid 50 Hz	100 mV/m	20 mV/m
Gränsvärde vid:		
f = 1 Hz- 10 Hz	$1/f$	$0,2/f$
f = 10 Hz – 100 Hz	0,1	0,02
f = 100 Hz – 200 Hz	$1 \times 10^{-3} \times f$	$0,2 \times 10^{-3} \times f$
f = 200 Hz – 1000 Hz	0,2	0,04
f = 1 kHz – 100 kHz	$2 \times 10^{-4} \times f$	$4 \times 10^{-5} \times f$

Tabell 12. Basic restrictions eller gränsvärden enligt ICNIRP Guidelines draft 2009 [4].

Baserat på Basic restrictions har man beräknat motsvarande mätbara storheter – Reference levels. Man har antagit en maximal koppling mellan yttre fält och in situ fältstyrka, d v s högsta skyddsnivå och att det yttre fältet är homogent över kroppen. För området upp till 100 Hz ger också Reference levels ett skydd mot påverkan av kontaktströmmar.

Enligt den nya utgåvan skall inverkan av de elektriska och magnetiska fältkomponenterna adderas för kontroll mot Basic restrictions, men det sägs inte hur detta skall ske. Framförallt riktningen av komponenterna kommer att variera i olika delar av kroppen, beroende på kroppens anatomi och det yttre fältets riktning. Addition utan hänsyn till vinkelskillnad eller fasläge är förmodligen den enda realistiska möjligheten.

Frekvensområde	Arbetstagare	
	B- fält (μT)	E-fält (V/m)
Insatsvärde vid 50 Hz	500 μT	10 000 V/m
Insatsvärde vid $f = 1 - 10 \text{ Hz}$	$2,5 \times 10^5/f^2$	20 000
$f = 10 - 25 \text{ Hz}$	$2,5 \times 10^4/f$	20 000
$f = 0,025 - 0,1 \text{ kHz}$	$25/f$	500/ f
$f = 0,1 - 0,4 \text{ kHz}$	250	5000
$f = 0,4 - 1 \text{ kHz}$	$100/f$	2000/ f
$f = 1 - 100 \text{ kHz}$	100	2000

Tabell 13. Referensnivåer eller insatsvärden för arbetstagare, ICNIRP 2009. (Ostörda rms värden) [4].

Frekvensområde	Allmänheten	
	B- fält (μT)	E-fält (V/m)
Insatsvärde vid 50 Hz	100 μT	5 000 V/m
Insatsvärde vid $f = 1 - 10 \text{ Hz}$	$5 \times 10^4/f^2$	10 000
$f = 0,01 - 0,025 \text{ kHz}$	$5/f$	10 000
$f = 0,025 - 0,1 \text{ kHz}$	$5/f$	250/ f
$f = 0,1 - 0,4 \text{ kHz}$	50	250/ f
$f = 0,4 - 1 \text{ kHz}$	$2/f$	250/ f
$f = 1 - 3 \text{ kHz}$	20	250/ f
$f = 3 - 100 \text{ kHz}$	20	87

Tabell 14. Referensnivåer eller insatsvärden för allmänheten, ICNIRP 2009. (Ostörda rms värden) [4].

Liksom i tidigare utgåva finns en begränsning för kontaktströmmar, d v s sådana urladdningsströmmar som kan uppstå vid kontakt med ett föremål på annan potential. Denna begränsning är inte satt för att skydda mot alla nivåer av kontaktströmmar, utan enbart mot direkt smärtsamma upplevelser.

Grupp	Frekvensområde	Maximal kontaktström (mA)
-------	----------------	---------------------------

Arbetstagare	$f = >0 - 2,5 \text{ kHz}$	1,0
	$f = 2,5 - 100 \text{ kHz}$	$0,4 \times f$
Allmänheten	$f = >0 - 2,5 \text{ kHz}$	0,5
	$f = 2,5 - 100 \text{ kHz}$	$0,2 \times f$

Tabell 15. Referensvärden för kontaktströmmar enligt ICNIRP 2009 [4].

Vad det gäller bedömning av samtidig exponering för fält med flera frekvenser gäller som tidigare att beräknade in situ fältstyrkor skall vägas mot aktuellt värde på Basic restriction och sedan adderas. Är summan mindre eller lika med 1, är den sammanvägda exponeringen inom gränsvärdet. Samma förfarande kan tillämpas både på de elektriska och magnetiska fälten och på kontaktströmmarna.

I den nya utgåvan av Guidelines finns ett avsnitt om exponering för fält med ett större inslag av övertoner och hur inverkan av dessa skall vägas samman. Troligen kommer det här avsnittet att omarbetas och kompletteras till den slutgiltiga utgåvan och därför lämnas inte här några ytterligare kommentarer om själva texten.

I ett avslutande informativt Annex diskuteras exponering för inhomogena fält. Det sägs att det är möjligt, men ofta väl konservativt, att mäta det maximala elektriska eller magnetiska fältet i position för kroppen. Alternativt kan man mäta medelvärde över en volym motsvarande en viss kroppsdel och sedan utnyttja dosimetriska uppgifter för respektive organ och för ett homogent fält. ICNIRP hänvisar i detta fall till en artikel av Stuchly och Dawson [32]. Även med denna metod överskattas i de flesta fall in situ fältstyrkan, men avvikelserna är mer måttliga. Stuchly och Dawson har beräknat inducerade storheter på detta sätt och jämfört med beräkning med ett modellerat inhomogent fält och funnit att in situ fältstyrkan i hjärnan kan överskattas på detta sätt med upp till 60 %.

Sammanfattningsvis ger det nya förslaget till ICNIRP Guidelines god vägledning för en exponeringssituation:

- För bedömning av enklare exponeringsfall finns Reference values.
- För bedömning mot Basic restrictions finns relationstal för E- och B-fält. Det kan bli möjligt att ta hänsyn om människan har kontakt med jord eller inte.
- Skillnaden vid exponering för magnetfält av olika riktning i förhållande till människokroppen kan däremot troligen inte utnyttjas, eftersom arbetspositionen sällan kan låsas så exakt.
- Det finns referensnivåer för kontinuerliga kontaktströmmar.
- Möjlighet finns att bedöma exponeringen vid inhomogena magnetfält.
- Det saknas vägledning för att bedöma inverkan av elektriska fält med betydande horisontella komponenter.

4 Arbete och avstånd

4.1 Arbete

I ställverk förekommer tre huvudtyper av arbete:

- Rondning, d v s inspektion över stora delar av ställverket. Den som genomför arbetet kan befinna sig både nära apparater och stativ för att kontrollera någon detalj, men också vara på långt avstånd från spänningsförande delar, t ex vid kontroll av staket mm. Arbetet genomförs till största delen från marknivå. Undantagsvis kan det bli aktuellt att klättra upp till en plattform eller liknande för någon speciell kontroll eller annan åtgärd. Generellt ett rörligt arbete som kan medföra exponering för förhållandevis höga elektriska fält, men då under en kortare tid.
- Arbete i icke spänningssatt fack, t ex i samband med renovering av apparater. Generellt en längre tids arbete i låga – måttliga fält.
- Arbete på apparater eller på anslutningar till dessa och byte av isolatorer i ett spänningssatt fack. Till denna grupp hör Arbete Med Spänning (AMS) och eventuellt andra arbeten som kan medföra vistelse nära spänningsförande delar (Arbete nära spänning). Arbetet kan medföra exponering för höga elektriska fält och i vissa fall även för höga magnetiska fält

För alla tre grupperna måste man räkna med att personal som utsätts för fält också kan komma i kontakt med jordade föremål. Möjligen är bara den AMS-montör som står på en isolerande plattform eller liknande, skyddad från kontakt mot jord.

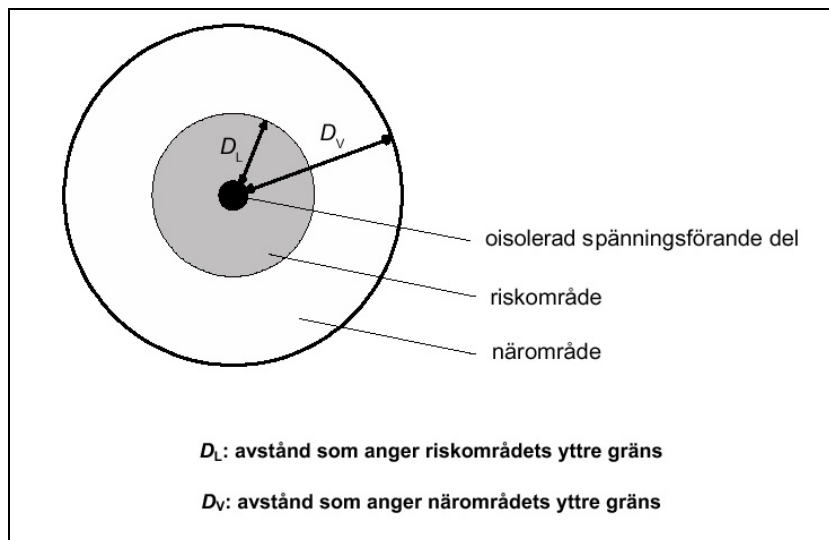
Tillträde till ställverk för 70 – 420 kV är begränsat genom staket och passagekontroll och alla som har anledning att vistas inom området måste därför kunna anses tillhöra gruppen arbetstagare. Det är i och för sig möjligt att installationer inom området ger upphov till höga fält strax utanför staketet och att allmänheten därmed skulle kunna bli berörd, men detta specialfall lämnas utanför denna rapport. Genomförda studier har också visat på låga fält omedelbart utanför ställverkens staket [13].

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 av en bedömning man gjort av risken för överslag och behovet av tillägg för ofrivilliga kroppsrörelser mm. Avståndet ges för ett antal spänningsnivåer i SS-EN 50 110-1:2005 [33] 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 [33].

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 spänningsförande delar är förbehållet personal som utför någon form av Arbete Med Spänning. Vid dessa spänningar (> 70 kV) är endast stång- och barhandsmetoderna tillämpbara och endast den senare kan medföra att personal kommer innanför riskområdets yttre gräns. Riskområdet kan nås via en isolerande plattform eller via någon form av isolerande lift.

Nominell systemspänning 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 16. Avstånd till Risk- och Närområdets yttre gräns enligt SS-EN 50 110-1:2005 [33]. 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 installation. Utrustning och personal kan befinna sig på marknivå eller på viss höjd ovan marken. Avståndet mellan spänningsförande del (fasledare) 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. Byggnads- och underhållsarbete, kan vara Arbete Nära Spänning eller särskilt arbete med spänning, beroende på avstånd mellan fasledare och arbetsställe. Vid Arbete Nära Spänning skall personalen vara instruerad om säkerhetsavstånd och andra säkerhetsåtgärder.

4.4 Arbete Med Spänning

Arbete Med Spänning (AMS) är allt arbete inom riskområdet. Montören kan befinna sig ovan, bredvid eller under fasledaren och även i området mellan två faser. Avståndet till närmaste fasledare 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 tillämplig, 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. Bilderna har tagits av Johan Andersson, Vattenfall Power Consultant AB, i samband med en resa i Australien. De har ställts till förfogande för detta projekt av Arne Lundqvist, Vattenfall Services Nordic AB.

4.5 Arbetsområde och avstånd vid olika typer av arbete

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

- Personer med särskild utbildning *kan befinna sig inom riskområdet med kroppsdel*. Huvuddelen av Arbete Med Spänning räknas till denna kategori
- Personer med särskild utbildning eller med instruktioner kan arbeta från mark eller i vissa fall från stegar och arbetsplattformar. *Vid denna typ av arbete kommer montören inte inom riskområdet med någon*

kroppsdel. Till denna kategori räknas Arbete nära spänning och visst Arbete Med Spänning.



**Figur 2. Arbete med barhandsmetoden med en slack vid samlingsskenan. Arbetet sker från en isolerande ställning och montörerna bär ledande dräkt. Den runda klämman med rött handtag som sitter om röret visar att de är potenti-
almässigt kopplade till skenan. Foto Johan Andersson, Vattenfall Power Consultant AB.**



Figur 3. Arbete med barhandsmetoden på anslutningen till en brytare.
Foto Johan Andersson, Vattenfall Power Consultant AB.



Figur 4. Arbete med barhandsmetoden på en ventilavledare.
Foto Johan Andersson, Vattenfall Power Consultant AB.



**Figur 5. Byte av strömbana på en frånskiljare med barhandsmetoden. Frånskiljaren är under arbetet kortsluten med en temporär strömshunt.
Foto Johan Andersson, Vattenfall Power Consultant AB.**



**Figur 6. Montage av strömshunt på en frånskiljare.
Foto Johan Andersson, Vattenfall Power Consultant AB.**

5 Ställverk - beräkningsförutsättningar

Denna studie omfattar luftisolerade ställverk för 70, 130, 220 och 420 kV. Avgränsningen till trots är varianterna många och därtill är installationerna av mycket varierande ålder. Ställverk för 130, 220 och 420 kV har studerats mer ingående, med både beräkningar och mätningar, medan för 70 kV har arbetet begränsats till beräkningar. Den utvalda stationen för 130 kV är av ny konstruktion, den för 220 kV av betydligt äldre datum och för 420 kV valdes både en gammal och en ny konstruktion.

Arbetet har inriktats på lågbyggda ställverk, eftersom dessa kan förväntas ha generellt högre fält.

I detta avsnitt ges en närmare beskrivning av respektive ställverk, med mer väsentliga avstånd och andra uppgifter nödvändiga för beräkningar av elektriska och magnetiska fält. Det givna avstånden skall ses som exempel på typiska avstånd men variationen kan ibland vara betydande.

5.1 70 kV av lågbyggd typ

Märkspänning: 77 kV

Märkström: 1 600 A (ledningsfack), 2 500 A (samlingsskena)

Avstånd mellan faser i inkommande luftledning: 3,0 m

Höjd till faser i inkommande luftledning: 6,0 m

Avstånd mellan faser i samlingsskena: 1,5 m

Höjd till faser i samlingsskena: 5,6 m

Avstånd mellan faser i fack: 1,5 m

Höjd till faser i fack: Brytarfack 4,5 - 5,0 m, i övrigt 4,0 - 4,5 m

Höjd apparatstativ: 2,5 m

Ledardimension samlingsskena: Rör diam 100 mm

Ledardimension fack: 910 mm², diam 39,2 mm

5.2 130 kV av lågbygd typ

Märkspänning: 145 kV

Märkström: 1 600 A (ledningsfack), 2 500 A (samlingsskena)

Avstånd mellan faser i inkommande luftledning: 3,5 m

Höjd till faser i inkommande luftledning: 10,5 m

Avstånd mellan faser i samlingsskena: 2,5 m

Höjd till faser i samlingsskena: ca 7,0 m

Avstånd mellan faser i fack: 2,5 m

Höjd till faser i fack: ca 4,5 m

Höjd apparatstativ: 2,5 m

Ledardimension samlingsskena: Rör diam 100 mm

Ledardimension fack: Al-lina 910 mm², diam 39,2 mm

5.3 220 kV av lågbygd typ

Märkspänning: 220 kV

Märkström: 5 000 A

Avstånd mellan faser i inkommande luftledning: 4,0 m

Höjd till faser i inkommande luftledning: 15,0 m

Avstånd mellan faser i samlingsskena: 3,5 m

Höjd till faser i samlingsskena: 9,0 m

Avstånd mellan faser i fack: 3,4 / 4,0 m

Höjd till faser i fack: 4,5 – 6,0 m

Höjd apparatstativ: 2,5 m

Ledardimension samlingsskena: Rör diam 150 mm

Ledardimension fack: Rör diam 150 mm

5.4 420 kV av äldre typ

Märkspänning: 420 kV

Märkström: 3 150 A

Avstånd mellan faser i inkommande luftledning: 9,0 m

Höjd till faser i inkommande luftledning: 18,0 m

Avstånd mellan faser i samlingsskena: 5,0 m

Höjd till faser i samlingsskena: 11,8 m

Avstånd mellan faser i fack: 6,5 m i brytarfack, 5,4 m i övrigt

Höjd till faser i fack: 6,8 m i brytarfack, 6,0 m i övrigt

Höjd apparatstativ: 2,7 m

Ledardimension samlingsskena: Rör diam 250 mm

Ledardimension fack: Rör diam 150 mm

5.5 420 kV av senare typ

Märkspänning: 420 kV

Märkström: 3 150 A (ledningsfack), 6 000 A (samlingsskena)

Avstånd mellan faser i inkommande luftledning: 6,0 m

Höjd till faser i inkommande luftledning: ca 17,0 m

Avstånd mellan faser i samlingsskena: 5,0 m

Höjd till faser i samlingsskena: ca 11,5 m

Avstånd mellan faser i fack: 5,5 m

Höjd till faser i fack: ca 7,2 m

Höjd apparatstativ: 2,5 m, stativ för CVT 1,8 m, för strömtrafo 2,1 m

Ledardimension samlingsskena: Rör diam 250 mm

Ledardimension fack: Rör diam 120 mm

6 Beräkningsmetoder

Den elektriska fältstyrkan (E-fältet) och den magnetiska flödestätheten (B-fältet) kan generellt beräknas med både analytiska och numeriska metoder. Båda metoderna har för- och nackdelar och därmed sina användningsområden. De analytiska beräkningarna kan användas för enklare geometrier, de kräver en begränsad mängd indata och man får ett resultat snabbt. De numeriska metoderna kommer till sin fulla rätt vid mer komplexa geometrier, men då krävs också tid för att bygga de geometriska modellerna. Ställverksmiljön som är generellt komplex, med en mångfald ledare och en stor mängd jordade apparatstativ, är givetvis ett typområde för numeriska beräkningar. I den här studien skall det dock visas att analytiska metoder är användbara om de används med lite eftertanke.

Beräkningarna kan delas in i tre grupper beroende på område eller var i ställverket man befinner sig:

- Fält nära ledare. Med nära avses här positioner inom riskavståndet.
- Fält nära apparatstativ och andra jordade konstruktioner.
- Fält på avstånd från ledare och jordade konstruktioner.

Resultat från de båda beräkningsalternativen kommer att jämföras och det kommer att visa sig möjligt var numeriska beräkningar blir ett krav och var det räcker med att göra enklare och snabbare analytiska beräkningar.

Beräkningarna kommer också att jämföras med de mätningar som gjorts i ställverk för 130, 220 och i 400 kV ställverk, de senare av både äldre och senare konstruktion.

6.1 Analytiska beräkningar

Den elektriska fältstyrkan har beräknats med en 3D-metod som anvisas i "Transmission Line Reference Book. 345 kV and Above". Metoden bygger på att ledarna ersätts med linjeladdningar där laddningen får variera över respektive ledarelement. E-fältet beräknas sedan som summan av fältet från de olika laddningarna, med hänsyn till fasläget. Vertikal fältkomponenter adderas för sig och horisontella för sig. Praktiskt taget alla analytiska beräkningar har genomförts med ett litet program kallat "EMF-4 Electric Field of Transmission Lines (3-D)" utvecklat av EPRI.

För beräkning av den magnetiska flödestätheten har ett motsvarande tredimensionellt program använts. Det går under benämningen "EMF-7 Magnetic Field (3-D)" och har även detta utvecklats av EPRI. Programmet bygger på Biot-Savarts lag och fältet från var strömförande ledare adderas med hänsyn tagen till strömmens fasläge och till ledarens placering i rummet.

De båda EPRI-programmen ingår i ett bibliotek av små hjälpprogram, kallade Applets, som levereras tillsammans med Transmission Line Reference Book. Den programutgåva som använts vid dessa beräkningar har versionsnummer 2.0 och är daterad 4/22/2005.

6.2 Numeriska beräkningar

För att kunna studera komplicerade geometrier, som inom ett begränsat område innehåller föremål uppbyggda av många detaljer, måste man använda 3-dimensionella numeriska beräkningsmetoder. Till exempel kan det vara intressant att närmare studera det elektriska fältet intill fackverksstolpar, apparatskåp och isolatorer, när faslinor och slackar befinner sig på kort avstånd. Beräkningarna ger också möjlighet att förstå hur isolatorer och de ledande egenskaperna hos stål förändrar fältbilden i sin närhet. Detta i sin tur gör det lättare att välja arbetsrutiner som innebär lägre fältnivåer. I det här projektet har COMSOL:s finitelementprogram Multiphysics version 3.4 använts vid beräkning av det elektriska fältet.

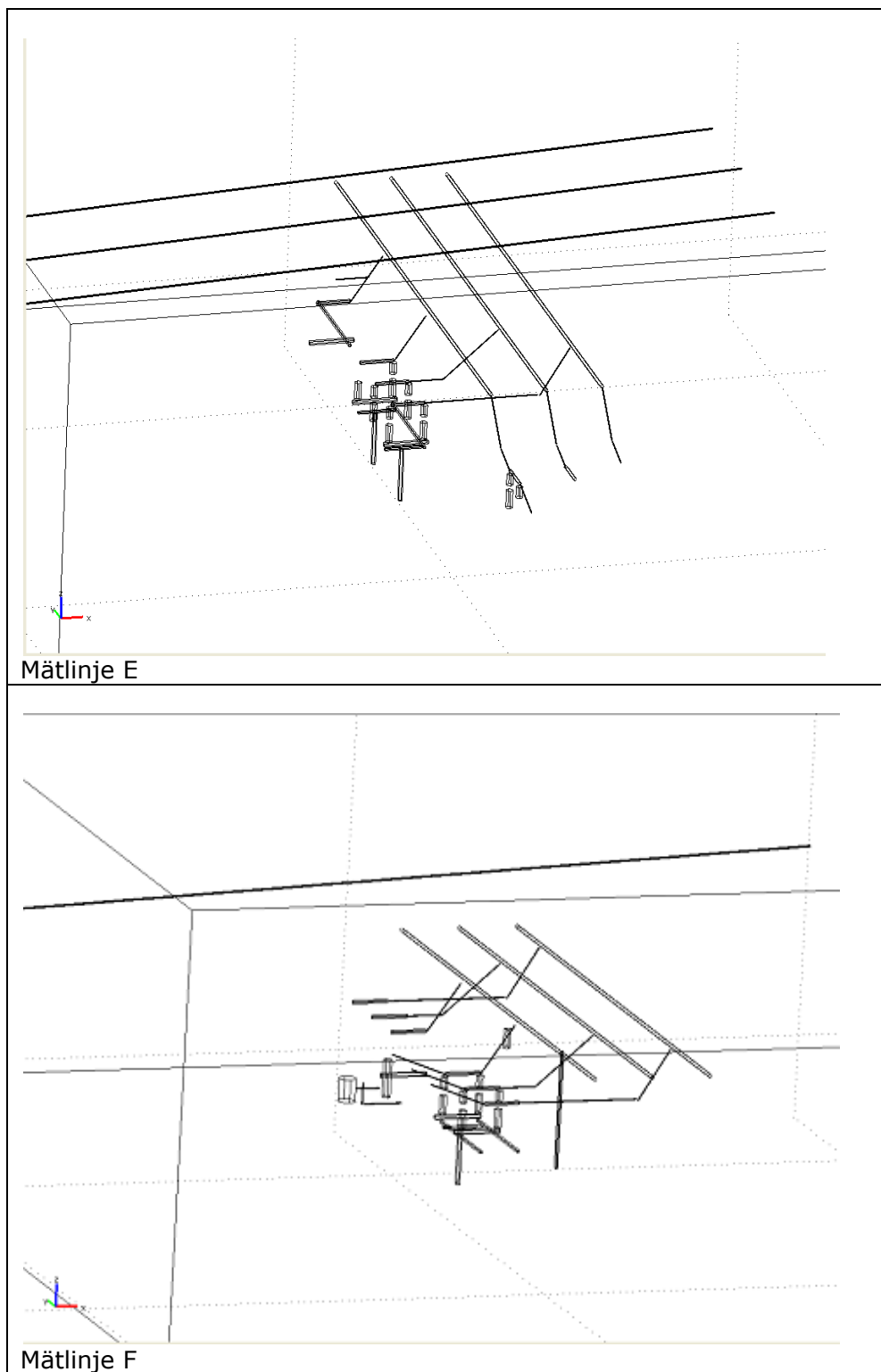
I programmet ansätts redan från början värden på de olika delarna som ingår i modellen. Ekvationer och vägar att lösa ekvationssystemen finns i programmet och kan väljas efter behov och insikt om olika möjligheter. I modellen ritas de ingående föremålen som skall studeras och vid beräkning av det elektriska fältet tilldelas de olika föremålen lämplig potential, som fas- spänning och jordpotential.

Nackdelen generellt med finitelementprogram är att det åtgår stor datorkapacitet och att de är tidsödande, speciellt för modeller som innehåller stora konstruktionsdetaljer och samtidigt områden med små detaljer. Detta gör att programmets elementuppdelning, dess mesh, måste väljas mer "grovmaskig" för att det överhuvudtaget skall vara möjligt att kunna lösa programmets ekvationer. En alltför grov mesh medför minskad noggrannhet vid beräkningen och i värsta fall går också värdefull information förlorad.

I de ställverksberäkningar som gjorts i det här projektet har inga korta stag modellerats, t ex stagen i fackverksstativen till brytare etc. Fackverken har vid beräkningarna modellerats som fyrkantsbalkar, oavsett om de består av I-balkar eller fyrkantsbalkar eller kombinationer av båda. Detta har medfört att inga riktigt små detaljer ingår i modellerna, och därmed har alla beräkningar kunnat genomföras med en "normal" mesh.

Två modeller har gjorts, en parallellt med samlingsskenorna (mätlinje E) och en vinkelrätt ut från samlingsskenorna (mätlinje F). Mätlinje E går mellan samlingsskenorna och frånskiljarfacken, 1 meter utanför närmaste fasledare. Mätlinje F från mittfasen på samlingsskenorna och 0,9 meter vid sidan om och förbi frånskiljar- och brytarfacken. I varje modell har bara det som påverkar respektive mätlinje tagits med i modellen, för att en så "finmaskig" mesh som möjligt skall kunna användas.

Isolatorerna har betydande dimensioner jämfört med t.ex. faslinorna. Hur de exakt påverkar det elektriska fältet är inte känt, men det kan antas att isolatorerna kan ha laddningar på ytan som ger bidrag till fältet. Därför har brytkamrarna plus $\frac{1}{4}$ av stödporslinets övre del tilldelats full potential, medan de $\frac{2}{4}$ längst ner på stödporslinet tilldelats nollpotential. Fjärdedelen mellan spännings- och nollpotential har ej modellerats. Stödporslinen i frånskiljarfacken har givits samma fördelning mellan spännings- och nollpotential som brytarnas stödporslin.



Figur 7. Överst modell för beräkning av E-fältet utefter mätlinje E och nederst modell för beräkning utefter mätlinje F.

7 Beräkningar och resultat

7.1 Elektrisk fältstyrka

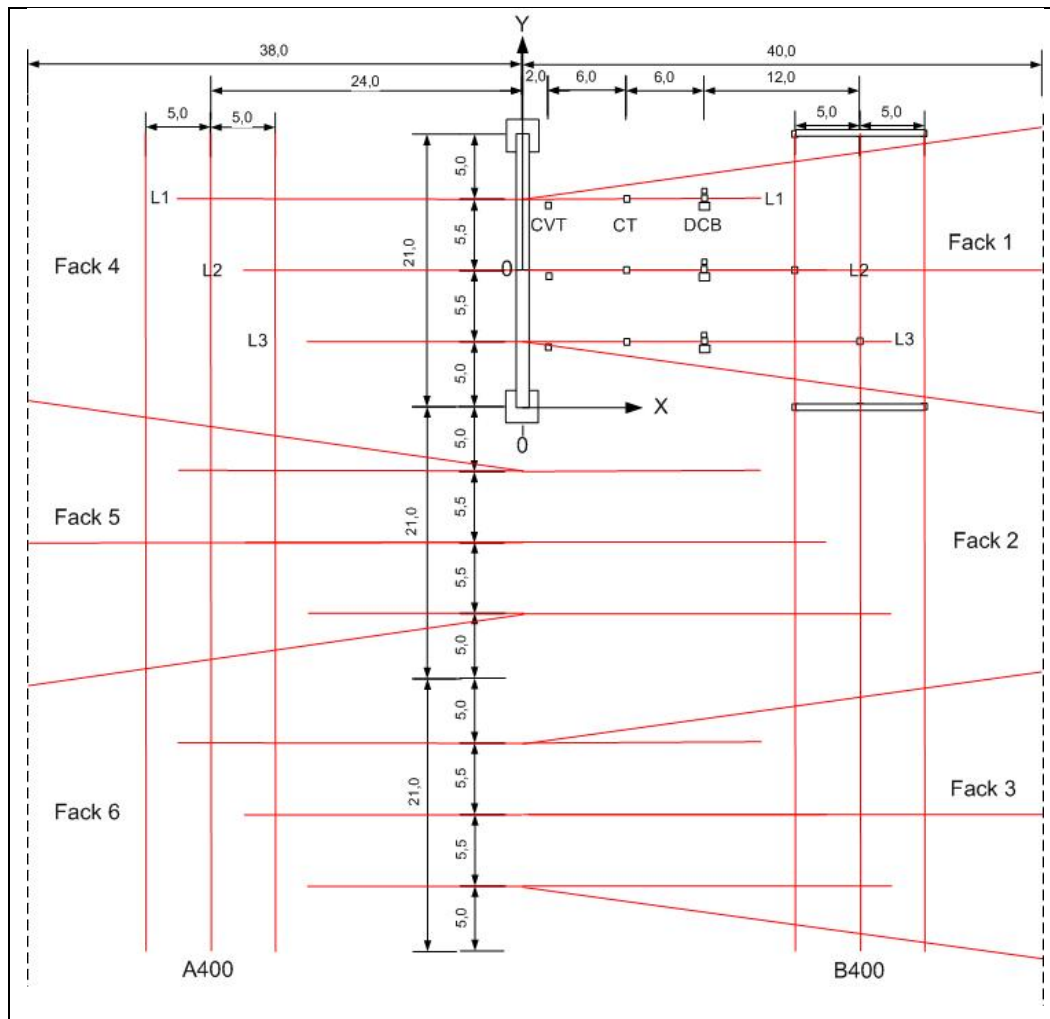
Den elektriska fältstyrkan i ett ställverk beror av fasledare och av jordade strukturer som apparatstativ, som stolpar mm. Fasledarna är bestämmande för fältet i stora drag, medan jordade strukturer kan ha en avgörande betydelse för det lokala fältet. Detta kan med fördel studeras med analytiska beräkningar och i det följande visas i några steg hur den elektriska fältstyrkan beror av olika element i ett generaliserat ställverk för 420 kV. Geometrin är typisk för ett kompakt ställverk av senare konstruktion, men resonemanget är användbart även för andra layouter och även för andra spänningsnivåer.

7.1.1 Fältstyrkan 1 – 2 m ovan mark i ett enkelt 420 kV ställverk

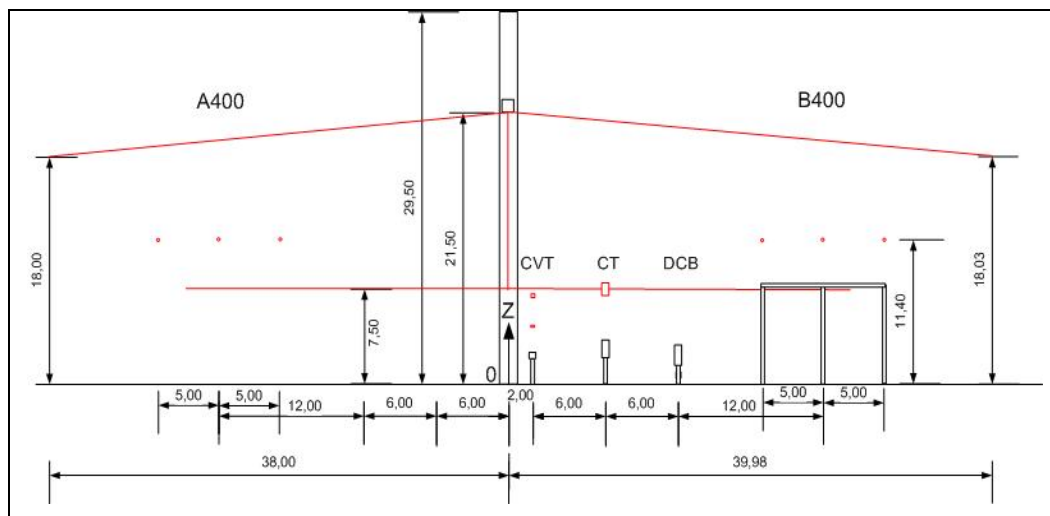
Ett mycket förenklat ställverk kan antas bestå av två samlingsskenor, tre plus tre fack och tre inkommande ledningar. I Figur 8 visas en plan över ett sådant ställverk där endast Fack 1 modellerats med jordade strukturer som stativ mm. I Figur 9 visas en sektion av samma ställverk. Samlingsskenan ligger på 11,4 meters höjd över mark och ledarna i facket på 7,5 meters höjd. Anslutningen mellan ledarna förenklas genom att låta ledarna i facket sluta 2,5 m innan kopplingspunkten med respektive skena. Isolatorer är helt utelämnade och apparaterna är ersatta med raka ledarelement. Trots förenklingar är denna modell tämligen komplex och tidskrävande att arbeta med. I det följande skall det därför visas vad som kan uppnås med olika grad av detaljering.

Modellen med tre plus tre fack kan enkelt halveras till en samlingsskena och tre fack, detta visas i Figur 10 som är kopierad direkt ur EPRI:s beräkningsprogram. Ledarelement återges med blå färg och med röd färg visas den linje som fältet skall beräknas längs. I Figur 10 visas en linje vid $X = 10$ m, men fältet har beräknats även vid $X = 2,5$ m och vid 17,0 m. Linjen vid 2,5 m passerar invid de kapacitiva mättransformatorerna (CVT i Figur 8 och Figur 9). Linjen vid 10 m ligger mellan strömtransformator (CT) och frånskiljande brytare (DCB) och linjen vid $X = 17,0$ m sammanfaller med körvägen inom ställverket. Beräkningslinjerna ligger alla på två meters höjd. Det är ett konservativt val, men kan motiveras då det är påverkan på det centrala nerv-systemet som är av primärt intresse och då det ännu inte ges någon annan direkt anvisning i standarder. I detta första beräkningsfall sträcker sig linjerna från $Y = -60$ m till $Y = 20$ m, vilket täcker de tre facken med viss marginal.

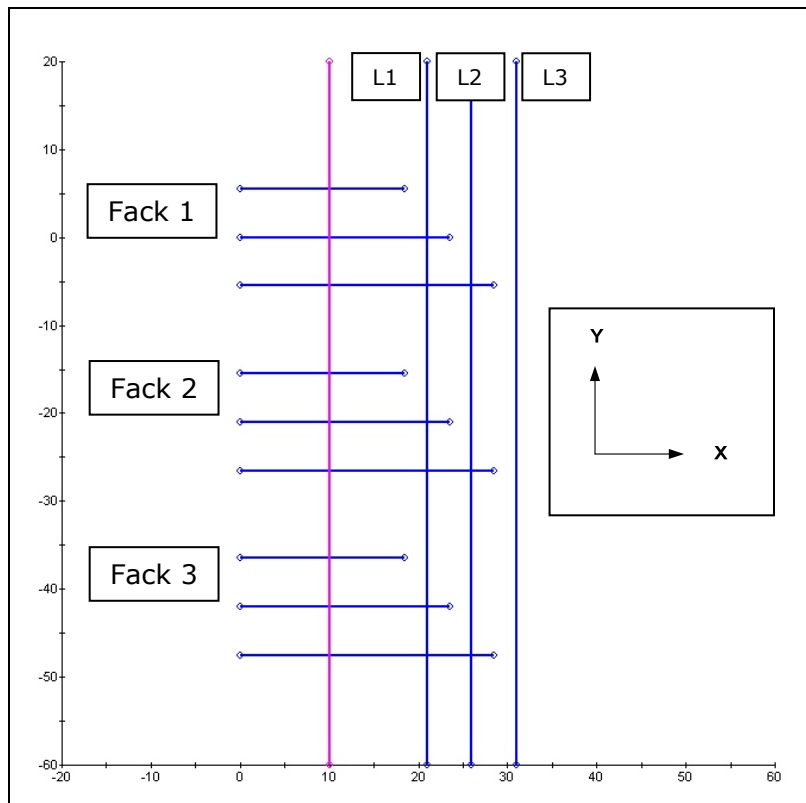
Fältet är generellt högre under ytterfaserna än under mittfaserna, likaså är fältet högre vid "ställverket" ytterändar, se Figur 11, övre delen. Detta beror på att fältkomponenterna motverkar varandra mer effektivt i mitten av var trefasgrupp. Högst fältstyrka fås i ytterändan av Fack 1, vilket beror på att ytterfasen i facket (L1) samverkar med motsvarande fas i samlingsskenan. De tre kurvorna visar också på betydelsen av ledarnas längd. Linjen vid $X = 10,0$ m ligger i stort sett i mitten av ledarna i facken, medan de övriga två ligger närmare respektive ändpunkt och uppvisar p g a detta lägre fältnivåer.



Figur 8. Plan över förenklat ställverk för 400 kV.



Figur 9. Sektion över förenklat ställverk för 400 kV.



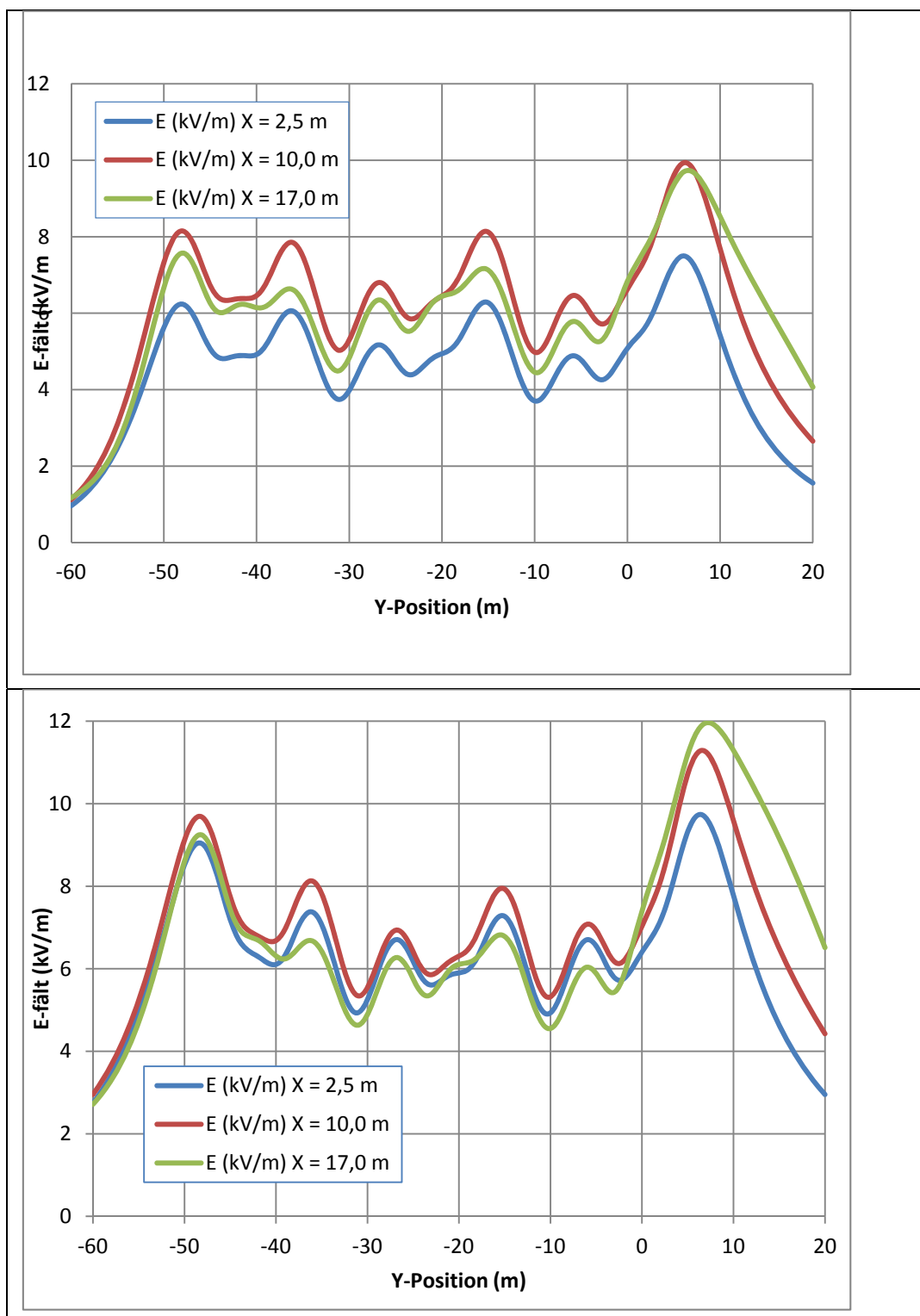
Figur 10. Plan visande förenklat ställverk för 420 kV med samlingsskena och tre fack. Fältet har beräknats längs tre linjer, linjen $X = 10$ m visas med rött.

Betydelsen av inkommande luftledningarna kan studeras på motsvarande sätt. Den enkla modellen i Figur 10 kompletteras i Fack 1 och 3 med vertikala ledare vid $X = 0$ och från dessa något lutande ledare ut till en tänkt första stolpe. Luftledningarna kan i dessa fall utgöras av en duplex 910 mm^2 , vilket här ersätts med en ekvivalent rund ledare. Diametern på denna väljs så att dess kapacitans till jord och omgivande faser blir densamma som för duplexledningen. I detta fall blir diametern 18,8 cm. Beräkningsresultatet visas i Figur 11, nedre delen och geometrin i Figur 12.

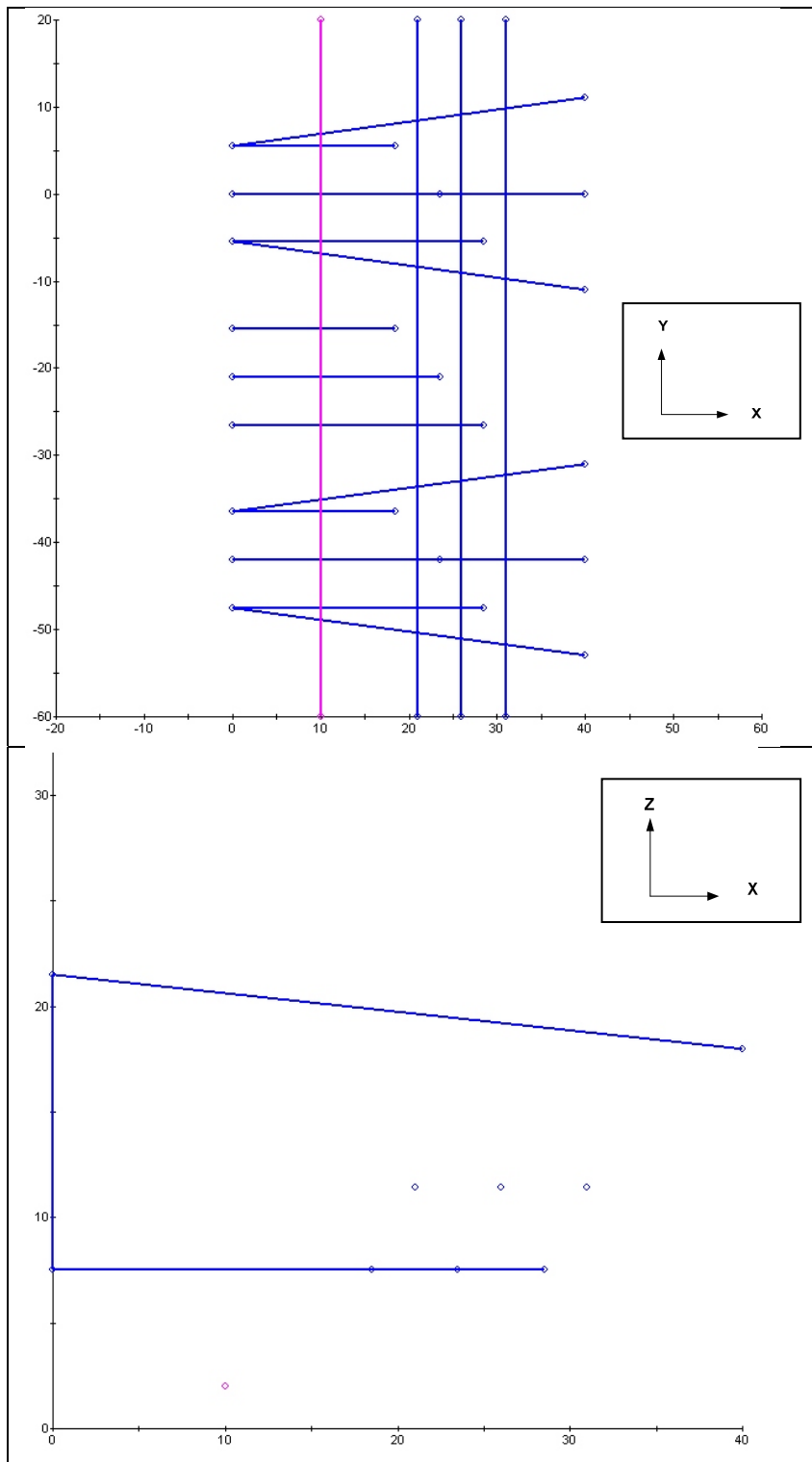
Luftledningen har stor betydelse trots att avståndet upp till linorna är 21,5 m vid $X = 0$ m och 18 m vid $X = 40$ m. Det ökande fasavståndet medför också att fältstyrkan ökar något i X -riktningen.

I ett större ställverk kan linjen $X = 0$ ses som en symmetrilinje och de fack, luftledningarna och den samlingsskena som finns på andra sidan om linjen kommer givetvis att påverka fältstyrkan i fack 1 - 3. Figur 13 visar plan och sektion för ett sådant utökat ställverk och Figur 14 beräknad fältstyrka. En jämförelse mellan de två beräkningsfallen i Figur 14 visar att inverkan av "den andra sidan" är begränsad och någon mer påtaglig inverkan syns bara på linjen vid $X = 2,5$ m, och då i synnerhet inom Fack 2 som påverkas av den tillkommande luftledningen.

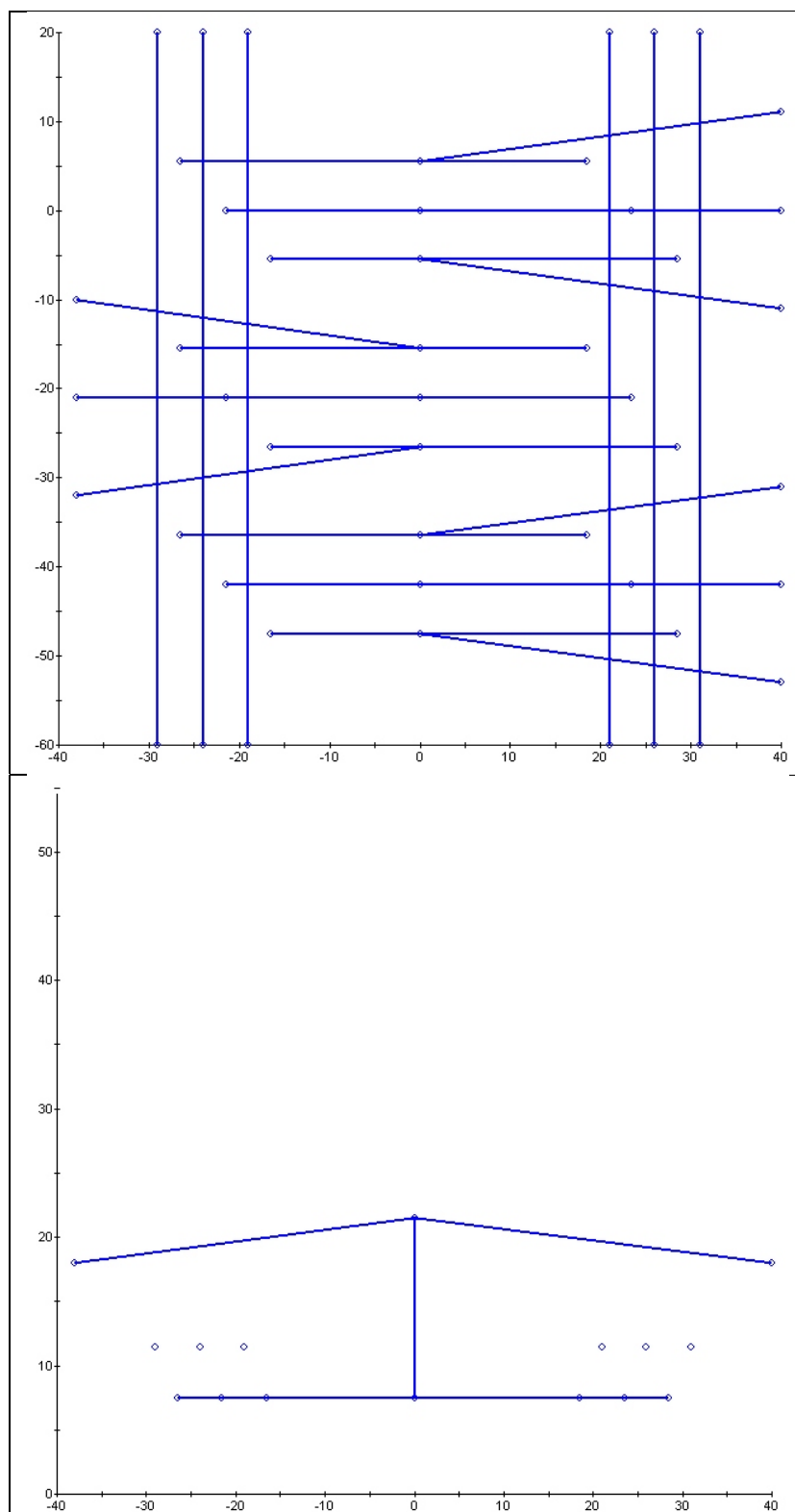
Den maximala fältstyrkan, med hänsyn till dessa totalt 42 olika raka ledarsektioner, uppgår till ca 12 kV/m på två meters höjd (12,1 kV/m i punkten



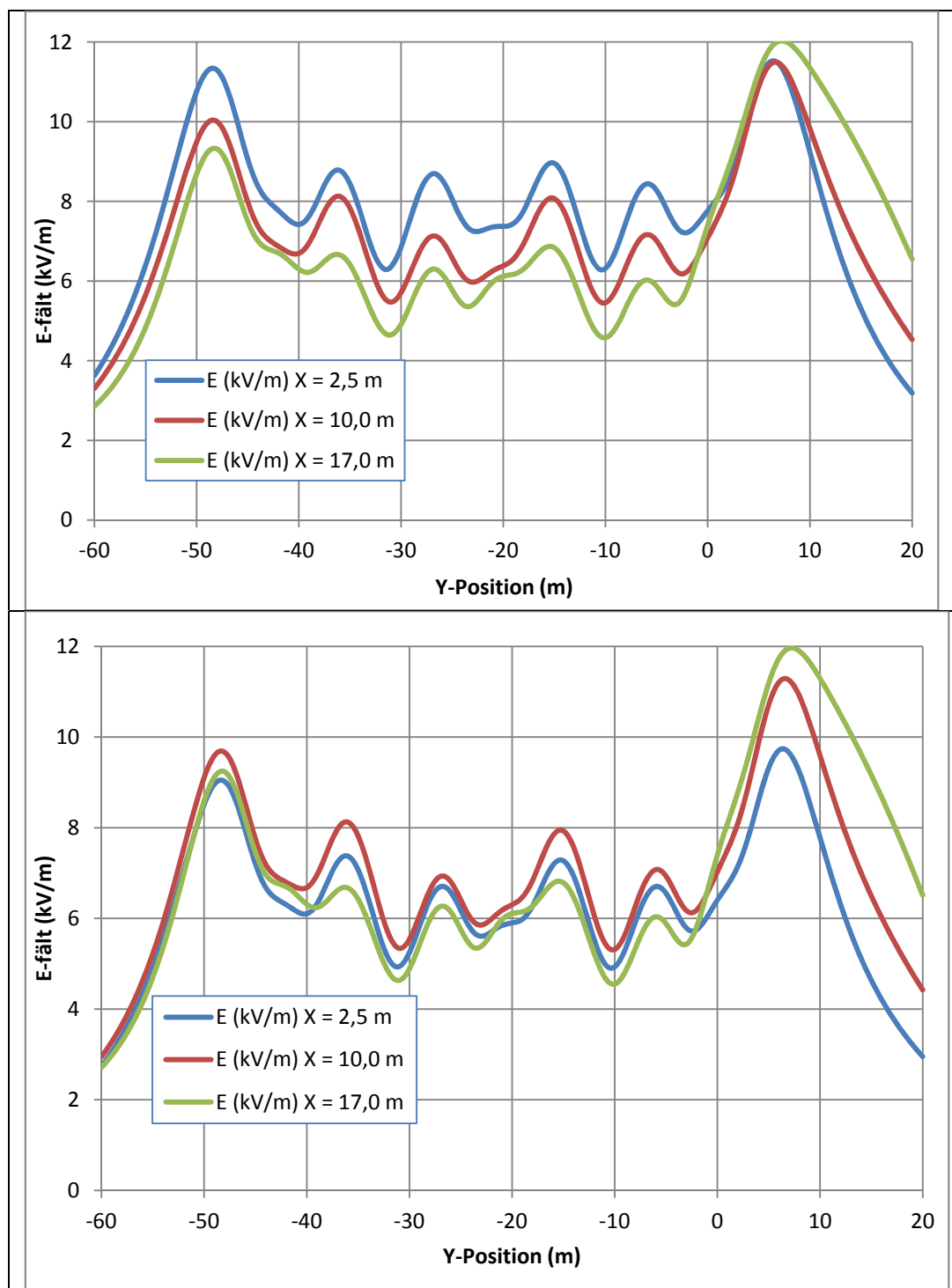
Figur 11. Beräknade fältstyrkor på två meters höjd. De övre kurvorna har beräknats med endast samlingsskena och tre fack. De nedre med inverkan av även luftledning i fack 1 och 3.



Figur 12. Plan (överst) och sektion visande förenklat 420 kV ställverk med samlingsskena, tre fack och inkommande luftledning i fack 1 och 3. Beräkningslinjen vid $X = 10$ och $Z = 2$ visas med röd färg.



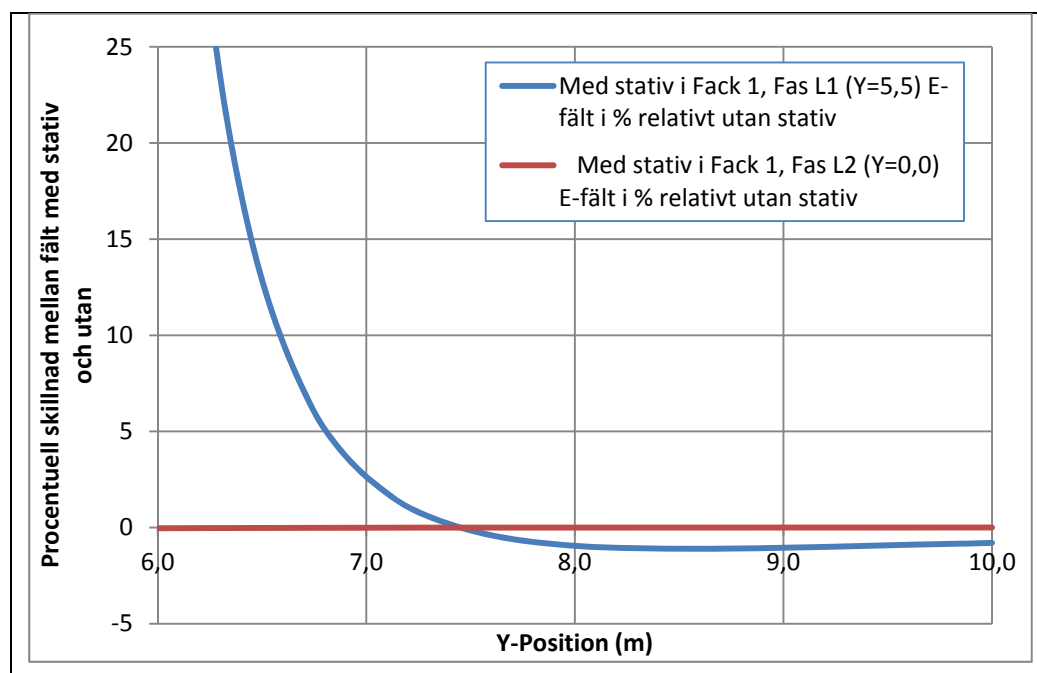
Figur 13. Plan (överst) och sektion för ett ställverk med två samlingsskenor, sex fack och tre inkommande ledningar.



Figur 14. Beräknade fältstyrkor på två meters höjd. De övre kurvorna har beräknats med en geometri enligt Figur 7, dvs med två samlingsskenor, tre+tre fack och luftledning i fack 1,3 och 5. De nedre kurvorna, som är identiska med Figur 11, nedre delen, har beräknats med en samlingsskena, tre fack och ledningar ovan i fack 1 och 3.

X=15,5 m och Y=7,0 m). Fältstyrkan minskar något med avtagande höjd ovan mark, men är ändå över 11 kV/m på 1 meters höjd. För maxvärdet är skillnaden i storleksordningen 5 % mellan 1 och 2 meter.

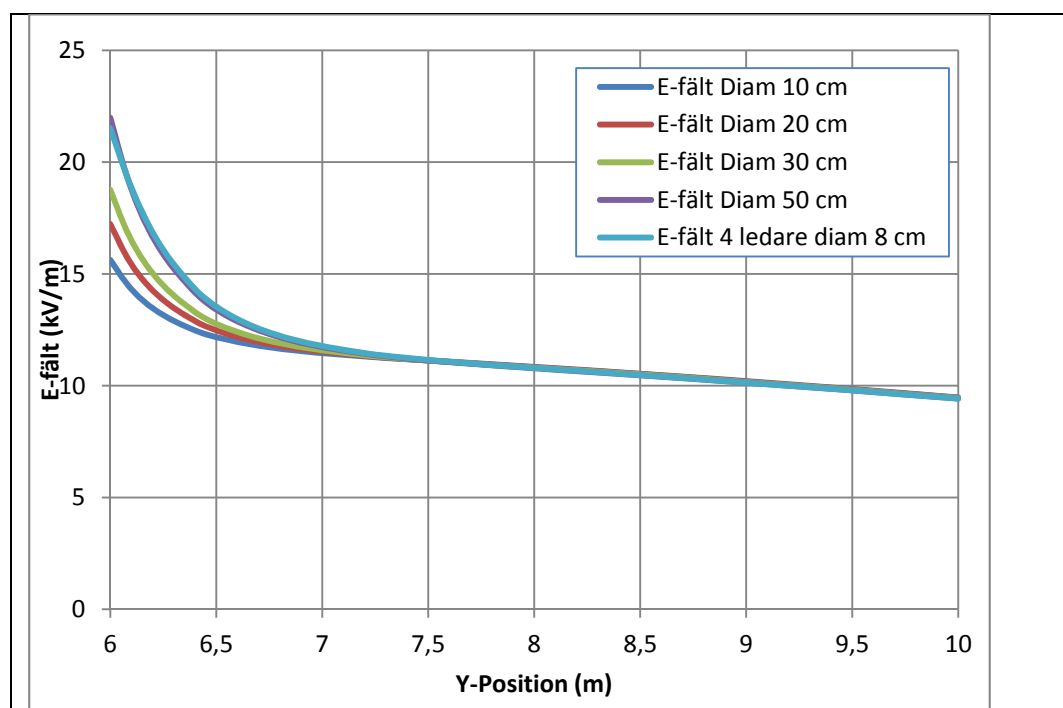
Betydligt större påverkan på fältstyrkan lokalt har stativ och andra jordade strukturer i ställverket. De kan verka avskärmande men de kan också förstärka fältet, allt beroende på var man mäter i förhållande till stativet och dess form. Stativen kan i sammanhanget betraktas som små och får en mer lokal påverkan. Detta visas i Figur 15, som visar effekten av ett stativ på två olika platser. E-fältet har i detta fall beräknats för Z=2,0 m och längs linjen X=8 m, Y=6 - 10 m. Blå kurva visar fältets ökning i % med ett stativ vid X=8 och Y=5,5, dvs beräkningslinjen börjar endast 0,5 m från det jordade stativets centrum. Röd kurva visar fältets ökning i % med stativet vid X=8 och Y=0, i detta fall skiljer det 6 m mellan stativets centrum och beräkningslinjens början. Påverkan från en fas till nästa är i detta fall liten och när det gäller påverkan mellan fack är påverkan helt försumbar.



Figur 15. Inverkan av jordat stativ i olika positioner. Fältet visas längs linjen Z=2,0, X=8,0 och Y=6 - 10 m. Röd kurva visar fältet med stativ vid X=8, Y=0 och blå kurva med stativ vid X=8, Y=5,5. Stativets diameter är i båda fallen 0,3 m

I fråga om stativ och pelare blir emellertid det enkla EPRI-programmet begränsande, då det bara kan hantera cirkulära ledarsektioner. Stativ till stöd-isolatorer och till apparater oftast är kvadratiska och av fackverkstyp. Programmet kan dock användas för att studera denna påverkan mer i allmänhet, vad stativhöjden medför etc. För att beräkna fältet i närheten av kantiga stativ och skåp till manöverdon krävs numerisk programvara och några exempel på detta redovisas i avsnittet för 130 kV.

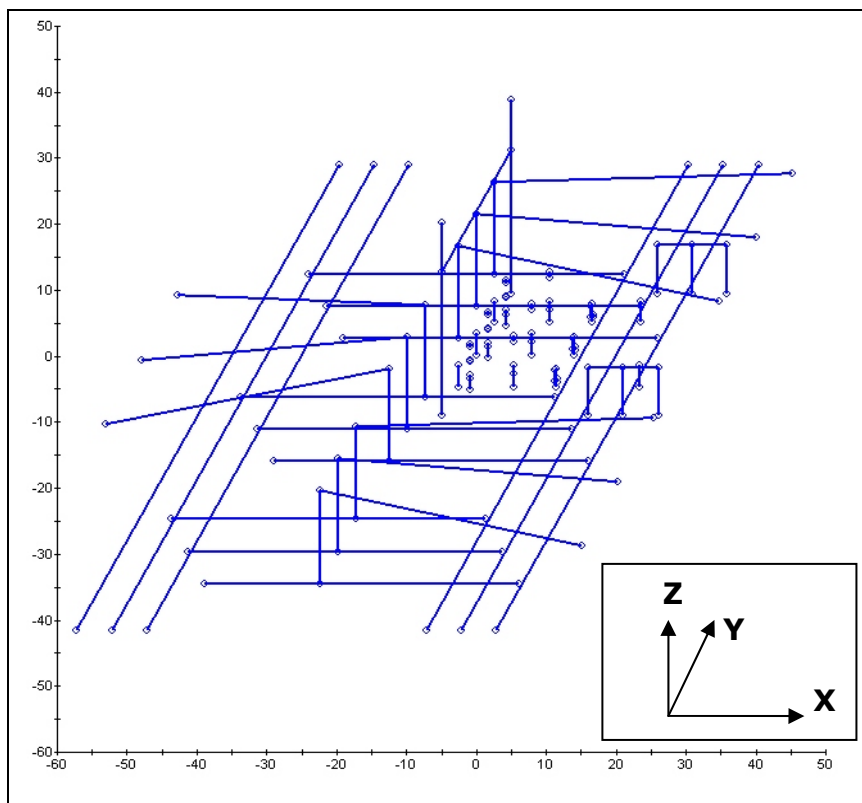
Om ett kvadratisk stativ av fackverkstyp skall ersättas med en rund pelare blir valet av diameter en intressant fråga. Möjligen kan man tänka sig att pelarens diameter skall väljas mindre än pelarens sida, då den senare har en öppen konstruktion, men hur mycket mindre ingalunda självklart. Om man främst intresserar sig för fältet på något avstånd från pelaren blir dock inte denna fråga så viktig. Figur 16 visar inverkan av olika pelardiametrar på det elektriska fältet. Kurvorna har beräknats för samma linje som i Figur 10, d v s $Z=2$, $X=8$ och $Y=6-10$ m. Pelarna har centrum vid $X=8$ och $Y=5,5$. Vid ett avstånd av 1,5 m ($Y=7,0$ m) från pelarcentrum är skillnaden helt obetydlig och vid 1 m avstånd är skillnaden upp till 10 % mellan de olika alternativen.



Figur 16. Inverkan av olika pelardiametrar. Fältet visas längs linjen $Z=2,0$, $X=8,0$ och $Y=6 - 10$ m. Pelaren med fyra ledare är uppbyggd med en ledare med diameter 8 cm placerade i hörnen av en kvadrat med sidan 0,42 m. Pelarcentrum vid $X = 8,0$ m och $Y = 5,5$ m.

För att ytterligare förfinas Fack 1 i modellen kan den kompletteras med tre element motsvarande mittpunkten ($U=50\%$) på kondensatorstaplarna till spänningstransformatorerna, tre element som motsvarar topphuven på dessa och tre större element som motsvarar topphuven på strömtransformatorerna. Den slutgiltiga modellen, med ledarelement, topphuvar och jordade stativ mm blir då uppbyggd av totalt 88 element, varav 37 st beskriver jordade stativ, apparatlådor och skåp. I Figur 17 visas modellen i perspektiv och i Figur 18 och Figur 19 visas fältstyrkan i Fack 1 längs linje $X=2,5$ resp. linje 10 och 17 m. I modellen har de stora men glesa stolparna som bygger upp portalen mellan Fack 1 och 4 ersatts med runda pelare med 1,0 m diameter. Apparatstativen, med ett kvadratisk tvärsnitt på $0,5 \times 0,5$ m, har ersatts med pelare med diameter 0,30 m. Apparat-tankar och skåp har ersatts med rör med en

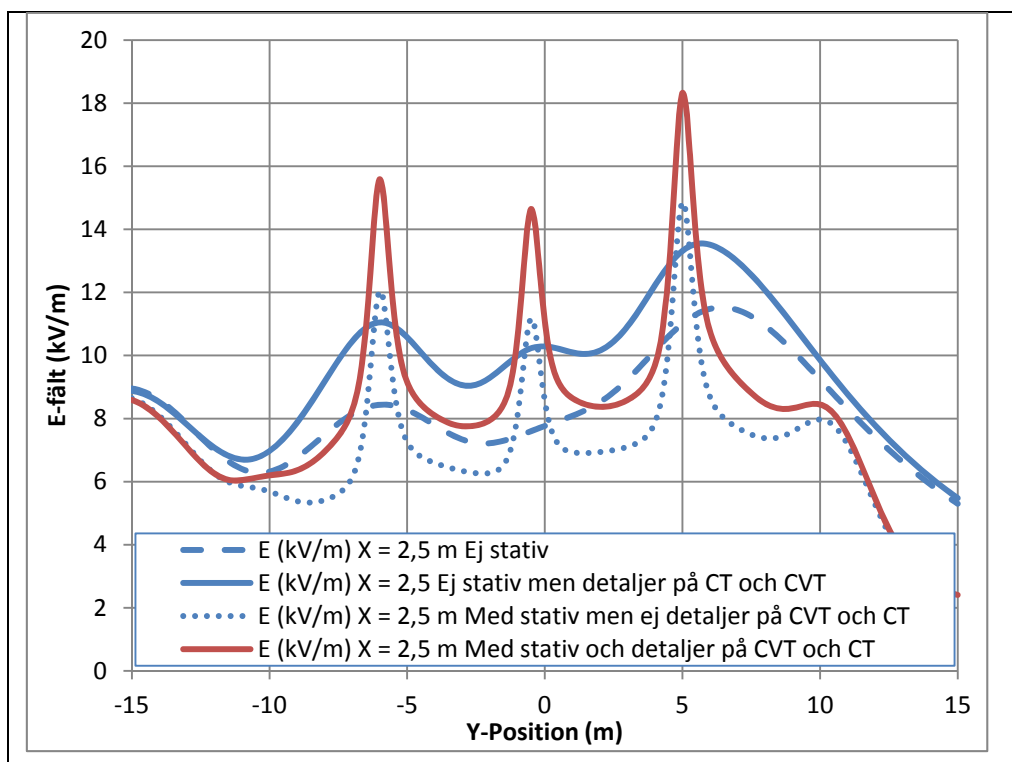
diameter som motsvarar den kortaste sidan. Dessa förenklingar medför fel; betydande nära respektive objekt, men högst rimliga på lite längre avstånd.



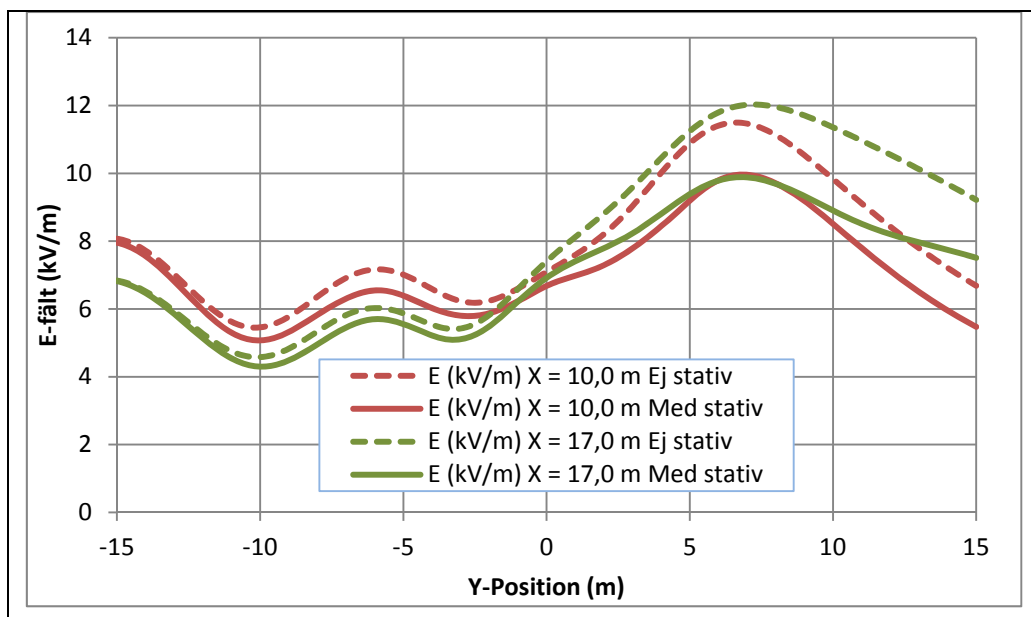
Figur 17. Modell med 88 ledare i perspektiv.

En jämförelse av kurvorna med och utan hänsyn till stativ och inte minst till topphuvar och mittflänsar visar på ett blandat resultat. I allmänhet verkar stativen skärmande på E-fältet, men i vissa fall kan närheten till stativ förstärka fältet kraftigt. Detta syns tydligt på kurvorna för $X = 2,5$ m i Figur 18, där den röda heldragna kurvan (med stativ) uppvisar betydligt markantare toppar än den streckade blå kurvan, som visar motsvarande utan hänsyn till stativ. Den prickade blå kurvan visar fältet med hänsyn till stativ men utan de extra ledarelement som motsvarar de stora toppkärlen på strömtransformatorerna (CT), de något mindre på toppen av kondensatorspänningstransformatorerna (CVT) och inte minst de mellanflänsar på kondensatorstaplarna som har halva spänningen. Kondensatorstaplarna är något lägre än andra apparater och både toppkärlen och mellanflänsarna kommer därmed lågt och får stor påverkan på det lokala fältet. Skillnaden mellan den heldragna blå kurvan och den streckade visar detta tydligt.

Figur 19 visar motsvarande effekter av stativ mm för det avsnitt av linjerna $X = 10$ m och 17 m som ligger inom Fack 1.

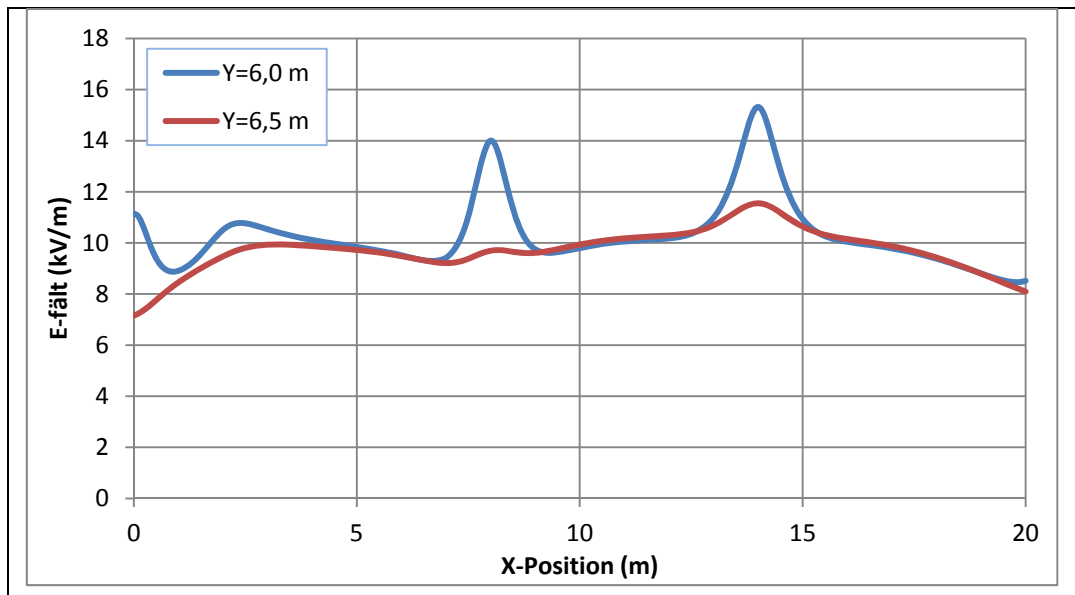


Figur 18. Beräknad fältstyrka i Fack 1. $Z=2,0$ m. Heldragna linjer visar beräknade värden med hänsyn till raka ledarelement, stativ mm, till topphuvar på mättransformatorer och även till mittflänsen på kondensatorspänningstransformatorer. De tre topparna sammanfaller med läget för dessa.



Figur 19. Beräknad fältstyrka i Fack 1, med och utan stativ. $Z = 2,0$ m.

Effekten av stativ mm kan också studeras med hjälp av två linjer vinkelrätt samlings-skenan i Figur 20. Vid $X = 8,0$ m passerar linjerna stativet till en strömtransformator och vid $X = 14$ m passeras manöverdonet till en brytare. De kortare avstånden för linjen $Y=6,0$ leder till markantare fältförstärkningar.

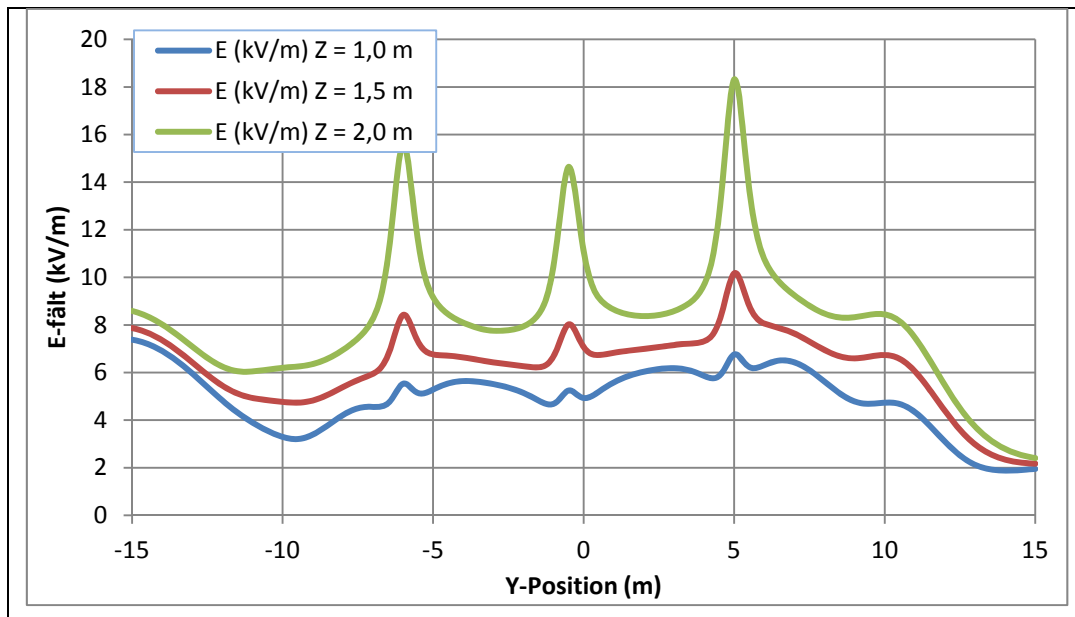


Figur 20. Beräknad fältstyrka längs två linjer vid $Y=6,0$ m och $Y=6,5$ m, $Z = 2,0$ m. Med hänsyn till raka ledarelement, stativ, topparhuvar på mättransformatorer och även till mittflänsen på kondensatorspänningstransformatorer.

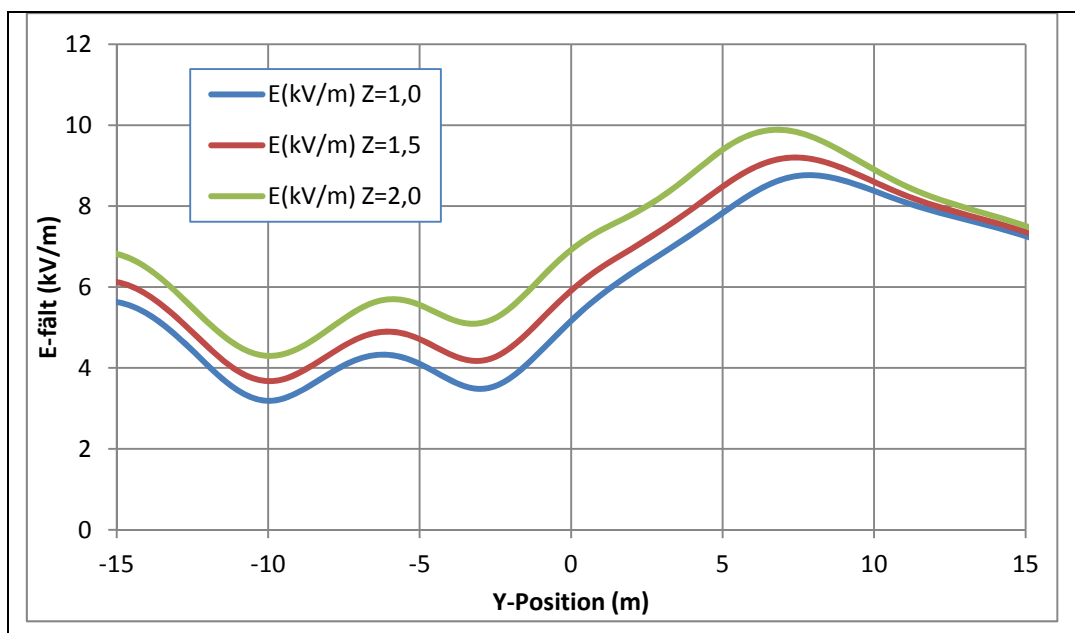
Ovanstående visar att den beräknade elektriska fältstyrkan uppgår till lokalt mellan 15 och 18 kV/m, på 2 meters höjd ovan mark. I dessa maxpunkter är skillnaden mellan 1 och 2 meters höjd mycket påtaglig. Lägre höjd ger bättre skärmverkan av stativen och att inverkan av spänningssatta mittflänsar blir mindre. Figur 21 och Figur 22 visar detta för linjerna $X=2,5$ resp. $17,0$ m.

Betydelsen av mät höjden på den avskärmade effekt som ett apparatstativ kan ha, kan också studeras genom att beräkna fältet längs en linje rakt ut från en lämplig apparat i ställverket. Strömtransformatorn i ytterfas (L1) i Fack 1 är lämplig att utgå ifrån och fältet beräknas för 1 och 2 meters höjd. Figur 23 visar den beräknade fältstyrkan. Se även den tidigare Figur 15.

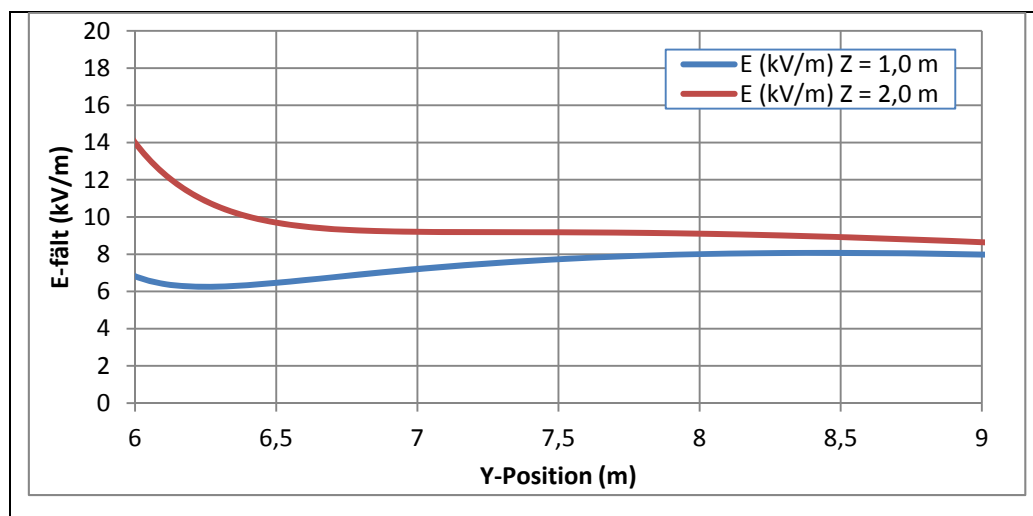
Kurvorna visar att på en meters höjd fås en viss skärmade effekt (-25 %) av apparatstativet, men på två meters höjd ökar fältstyrkan kontinuerligt in mot stativet och blir nära pelaren i storleksordningen dubbelt så högt som på 1 meters höjd.



Figur 21. Beräknad fältstyrka för linjen $X = 2,5$ m, $Z = 1,0$, $1,5$ och $2,0$ m. Modell med raka ledarelement, stativ, topparhuvar på mättransformatorer och även mittflänsen på kondensatorspänningstransformatorer.



Figur 22. Beräknad fältstyrka för linjen $X = 17,0$ m, $Z = 1,0$, $1,5$ och $2,0$ m. Modell med raka ledarelement, stativ, topparhuvar på mättransformatorer och även mittflänsen på kondensatorspänningstransformatorer.



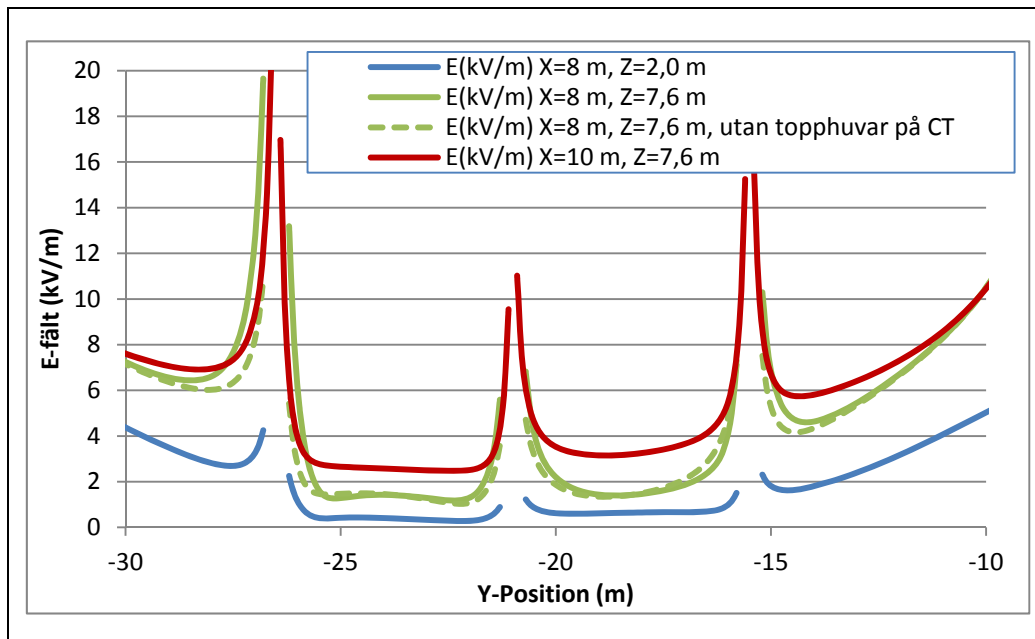
Figur 23. Beräknad fältstyrka längs en linje ut från strömtransformatorn i Fack 1. Stativ med diameter 0,30 m i punkten X=8,0, Y=5,5 m.

7.1.2 Fältstyrkan i icke spänningssatta fack

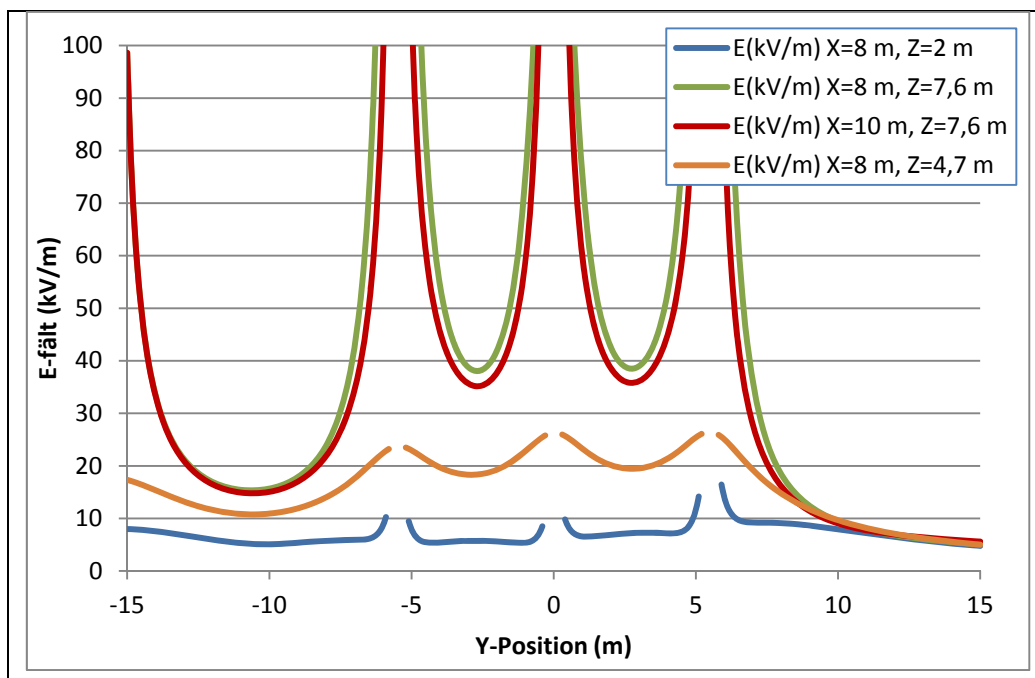
Även arbete på apparater i ett icke spänningssatt fack kan medföra exponering för tämligen höga fält och i synnerhet om arbetet sker i nivå med högspänningsapparaternas anslutningar. Samlingsskenan bidrar till det höga fältet och även ledare i angränsande fack. Figur 24 visar den beräknade fältstyrkan i Fack 2, vid X = 8 m, som kan tänkas motsvara arbete på strömtransformatorerna. Vid beräkningen antas Fack 2 och 4 vara spänningssatta fram till respektive frånskiljande brytare. Fältstyrkan stiger kraftigt mot strömtransformatorerna och deras stativ och i nivå med anslutningarna (Z = 7,6 m) fås lokalt höga fältstyrkor, nära apparaterna väl över 10 kV/m. Fältbilden närmast apparaterna är svårbestämd då den är beroende av den lokala geometrin. De två kurvorna för med och utan topphuvar på strömtransformatorerna (CT) visar detta tydligt. Kurvan för X = 10 m, dvs mellan strömtransformator och brytare, är mindre påverkad av jordade föremål och ligger dessutom närmare den spänningssatta delen av brytaren. Nivån på fältet blir p g a detta generellt högre, med lokala toppar på 10 - 20 kV/m.

7.1.3 Fältstyrkan nära spänningssatta ledare

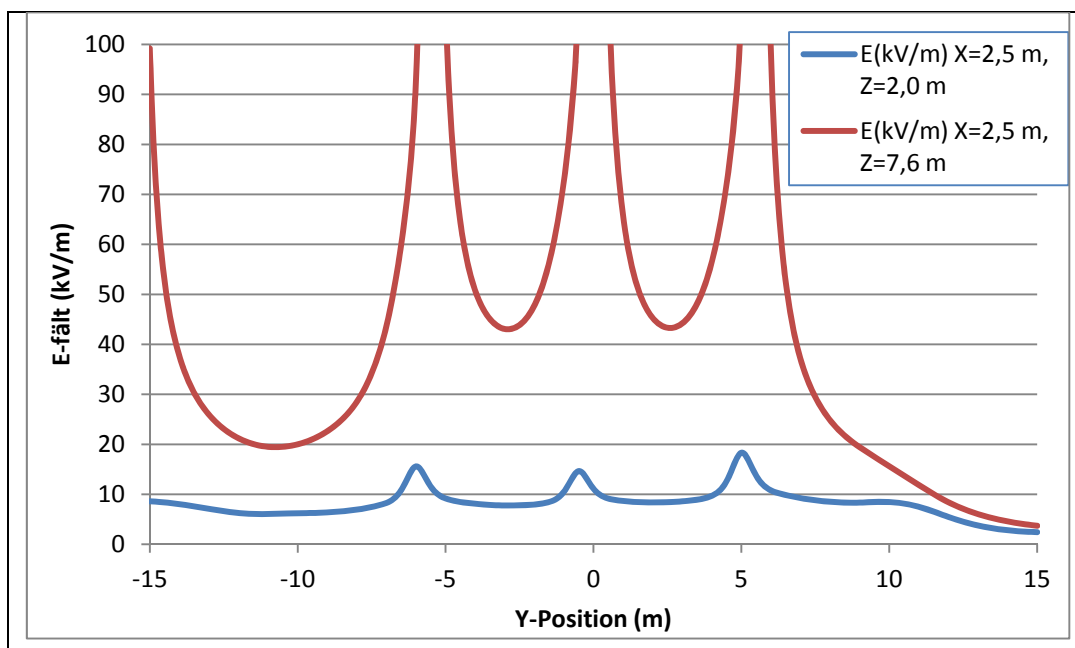
Det är framförallt vid arbete med barhandsmetoden som fältstyrkan nära spänningssatta ledare blir intressant. En sådan tänkbar arbetsoperation vore en förbikoppling eller shuntning av en strömtransformator för att möjliggöra ett utbyte. Montörer skulle då behöva arbeta i nivå med transformatorns anslutningar och då vara nära både ledarrör och den stora spänningssatta topphuven. I Figur 25 visas det beräknade fältet längs en linje vid X = 8 m och Z = 7,6 m, dvs i läge för strömtransformatorerna. I samma figur finns även linjen X = 10 m, för att visa på den inverkan som strömtransformatorernas topphuvar har på det lokala fältet. Fältet har beräknats för Fack 1 och med hänsyn till de jordade strukturer som bl a visas i Figur 17. Figur 26 visar motsvarande för X=2,5 m.



Figur 24. Beräknad fältstyrka i Fack 2. Facket, liksom Fack 4, är spänningssatta fram till den frånskiljande brytaren. Avbrotten i kurvan beror på att beräkningslinjerna går genom stativ (X=8 m, Z=2,0 m), topphuvar (X=8 m, Z=7,6 m) och rör (X=10 m, Z=7,6 m).



Figur 25. Beräknad fältstyrka i ett spänningssatt Fack 1 vid X=8 m och 10 m. Avbrotten i kurvan beror på att de går genom apparater och ledarrör. Kurvan för Z = 4,7 m visar på fältet på 7,5 - 4,7 = 2,8 meters avstånd, dvs vid riskområdets yttre gräns.

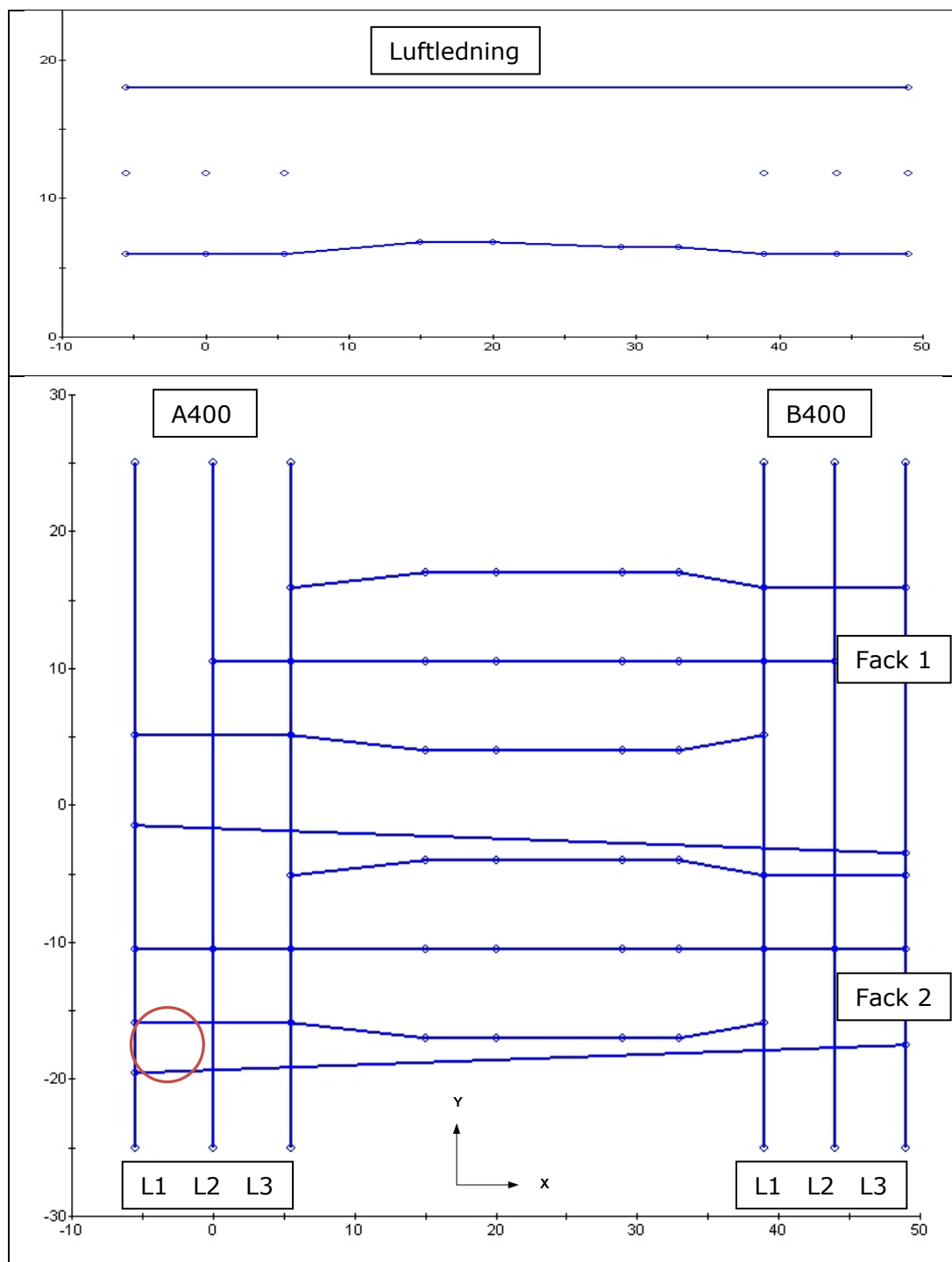


Figur 26. Beräknad fältstyrka i Fack 1 vid X=2,5 m. Avbrotten i kurvan beror på att den går genom topphuvar och ledarrör.

Fältstyrkan nära ledarna blir givetvis mycket hög. På 1 meters avstånd från strömtransformatorerna ($X = 8$ m) blir fältet i storleksordning 40 – 80 kV/m, beroende på fas och vilken sida man närmar sig. Fältstyrkan vid $X = 10$ m blir något lägre, 40 – 60 kV/m vid 1 meters avstånd och vid $X = 2,5$ m 50 – 70 kV/m. Även vid riskområdets yttre gräns, som är 2,8 m vid 420 kV, blir fältstyrkan fortfarande hög. Utanför ytterfaserna blir fältet 15 – 25 kV/m och i området mellan ytterfas och mittfas 35 – 45 kV/m. I området under faserna fås 20 – 25 kV/m. Det är svårt att förutse exakt hur ett eventuellt barhandsarbete skulle kunna bedrivas, men troligen måste man komma nära apparaten i fråga, ca 0,5 m ifrån med huvudet kan vara en rimlig siffra. Vid dessa avstånd blir fältstyrkan mycket hög, i storleksordningen 100 – 150 kV/m beroende på fas och sida på respektive apparat.

7.1.4 Elektrisk fältstyrka i ett 400 kV ställverk av äldre konstruktion

Ställverk av äldre konstruktion är i allmänhet byggda med något större fasavstånd än vad som använts senare och avståndet upp till skenor och fack är ej sällan lägre i äldre lågbyggda konstruktioner. Tillsammans medför detta att fältstyrkan blir något högre i de äldre konstruktionerna än i de senare. Figur 27 visar ett förenklat ställverk med två samlingsskenor, två fack och en luftledning. Fasavståndet i facken varierar mellan 5,4 och 6,5 m, med det större avståndet vid brytarna. Höjden till ledarrören i facken varierar mellan 6,0 och 6,8 m, med den högre höjden vid brytarna. Modellen har baserats på en verklig förlaga, men ritningsunderlaget har anpassats för att ge en rimligt komplex modell.

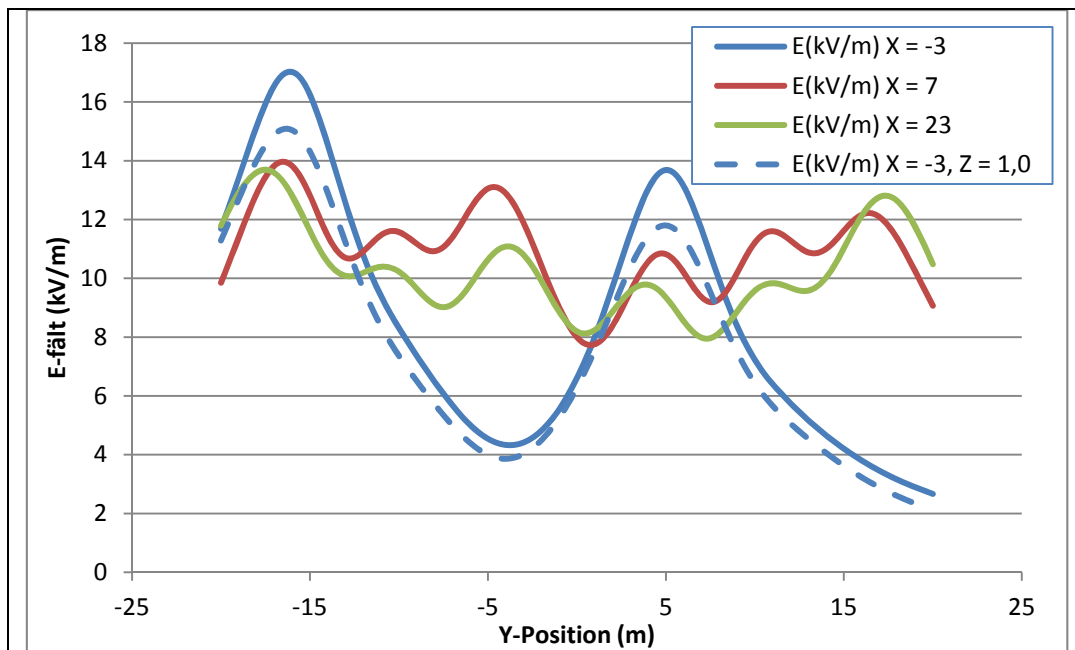


Figur 27. Ett förenklat 400 kV ställverk av äldre konstruktion. Sektion överst och plan nederst. Högst fältstyrka, i storleksordningen 17 kV/m, fås i området markerat med rött där luftledningen samverkar med skenorna på lägre nivå.

Fältstyrkan längs två linjer, parallellt med och vinkelrätt mot samlings-skenorna visas i Figur 28 och Figur 29.

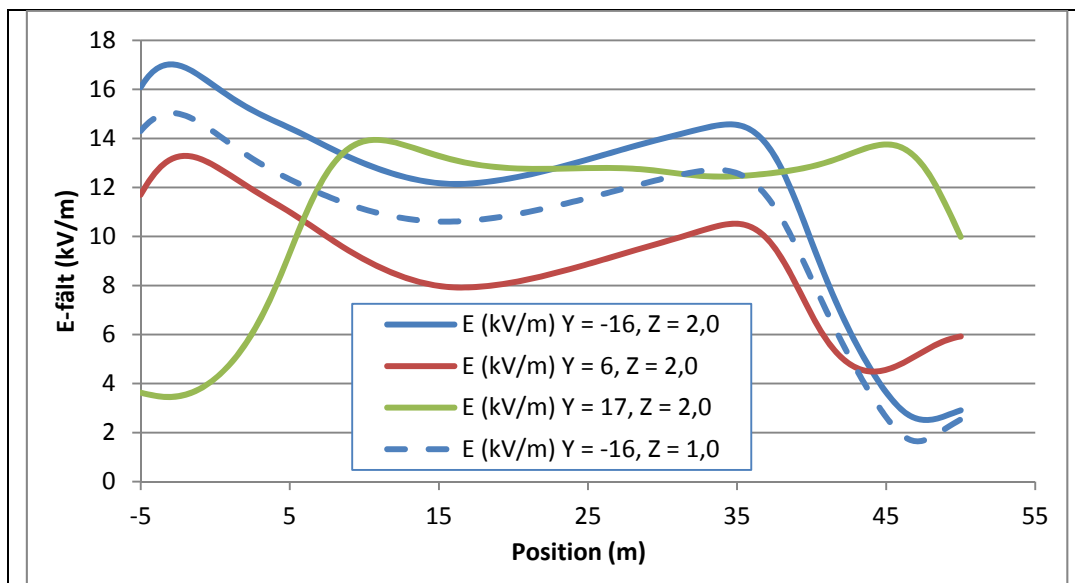
De beräknade värdena, utan någon hänsyn till jordade stativ och dylikt, visar på maxfältstyrkor på ca 17 kV/m och värden >10 kV förekommer tämligen allmänt.

Apparatstativen torde ha en liknande inverkan i dessa ställverk som i de av senare datum. Det ledande stålet kan både skärma fältet och förstärka det. Fältstyrkor i storleksordningen 20 kV/m, möjligt upp till 25 kV/m, bör därför kunna förekomma nära stativ och på 2 meters höjd.



Figur 28. Beräknad fältstyrka längs tre linjer parallellt med samlings-skenorna. Linjen vid $X = 23$ går i kanten på vägen genom ställverket. Beräkningshöjd $Z = 2,0$ m där ej annat anges.

Kurvorna visar, precis som för de yngre ställverken, att samverkan mellan samma faser i fack och samlingsskena leder till höga nivåer. Finns även en överliggande luftledning blir effekten än mer påtaglig. I ställverkets inre delar fås mer eller mindre påtaglig cancellation mellan olika faser och fältnivåerna blir lägre än vad som fås strax utanför ytterfaserna.



Figur 29. Beräknad fältstyrka längs tre linjer vinkelrätt mot samlings-skenorna. Beräkningshöjd $Z = 2,0$ m där ej annat anges.

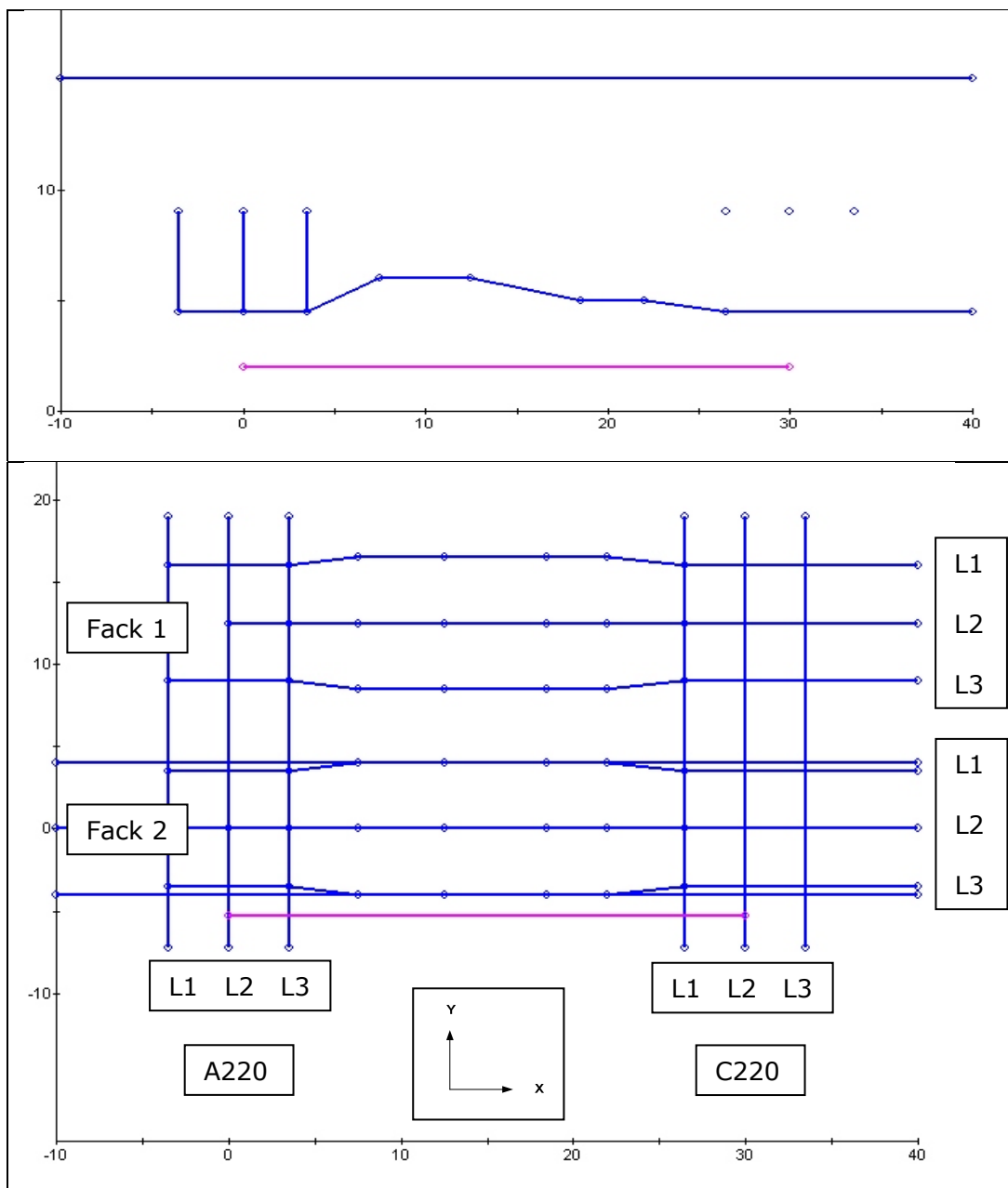
7.1.5 Elektrisk fältstyrka vid 420 kV i korthet

Resultatet av de analytiska beräkningarna av den elektriska fältstyrkan i ett förenklat 400 kV ställverk kan sammanfattas enligt följande:

- Fältstyrkan varierar kraftigt inom ställverket och närheten till apparatstativ och andra jordade föremål kan påverka fältet både uppåt och nedåt. Nära jordade stativ, och då i synnerhet i huvudhöjd, kan fältstyrkan bli hög, lokalt väl över 20 kV/m. På något större avstånd från stativ etc, kan fältstyrkan på två meters höjd nå upp till ca 12 kV/m och till knappt 10 kV/m på en meters höjd. Bortsett från lokala fältförstärkningar runt stativ mm ger enkla beräkningar utan jordade strukturer ett högre fält än om dessa inkluderas. Se Figur 14 och Figur 19.
- Samverkan mellan ledare av samma fas i samlingsskena och fack ger högre fält. Med en luftledning över facket blir sammanlagringseffekten än mer påtaglig.
- Vid arbete på apparater och ledare i icke spänningssatta fack kan E-fältet nå över 10 kV/m och lokalt nära apparaterna upp mot 20 kV/m.
- Arbete vid närområdets yttre gräns (5,3 m) kan lokalt medföra exponering för fält i storleksordning 15 - 20 kV/m och mer allmänt ca 10 kV/m.
- Arbete vid riskområdets yttre gräns (2,8 m) kan medföra exponering för fält i storleksordningen 15 - 45 kV/m. Generellt högre värden mellan faserna än utanför ytterfaserna.
- Arbete med barhandsmetoden på spänningssatta apparater och ledare medför exponering för fält väl överstigande 40 kV/m och i vissa fall överstigande 100 kV/m.

7.1.6 Elektrisk fältstyrka i ett förenklat 220 kV ställverk

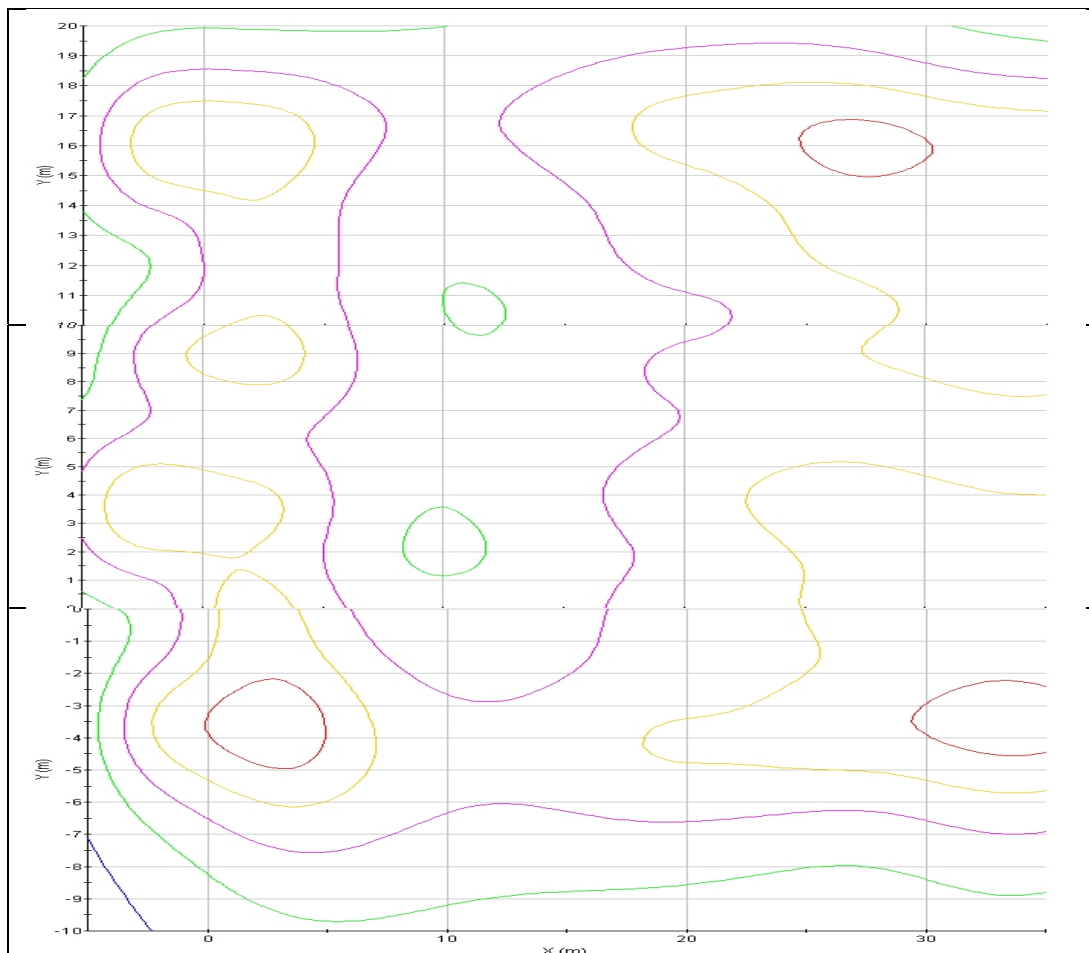
Ett mycket förenklat 220 kV ställverk kan antas bestå av två samlingsskenor och två fack. En inkommande luftledning antas gå över det ena facket. Figur 30 visar de spänningsförande detaljerna.



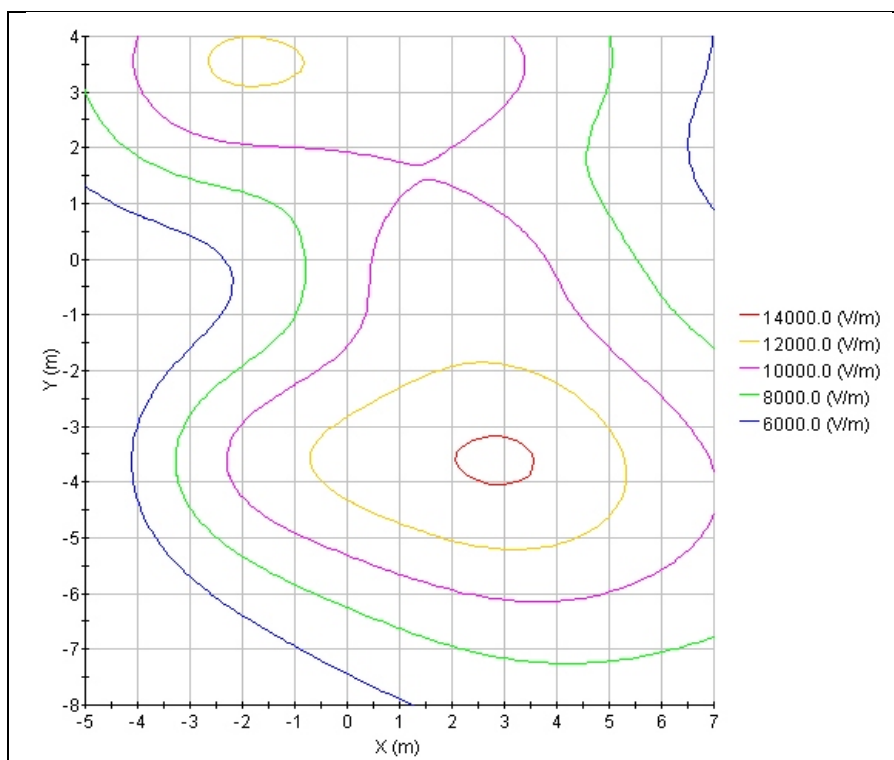
Figur 30. Sektion överst och plan nederst över ett förenklat 220 kV ställverk. En av de två beräkningslinjerna är markerad med rött. Fasavståndet vid brytarna och frånskiljarna är 4,0 m, i övrigt 3,5 m. Luftledningen ligger horisontellt 15 m ovan mark. Höjden till ledarna i facket varierar mellan 4,5 och 6 m. Vid de dubbla V-brytarna (med 4 brytkammare), vid $X=10$ m är höjden 6 m och över frånskiljarna ($X=20$ m) 5 m. Modellen slutar vid $X=40$ m, men förlagan fortsätter fram till B-skenan .

I beräkningsmodellen ingår inga stativ eller andra jordade strukturer och antalet element har därmed kunnat begränsas till 52 st. Den elektriska fältstyrkan har beräknats längs tre linjer, varav den ena visas i Figur 30. Den markerade linjen parallellt med facken har sin 0-punkt rakt under mittfasen i A220 och går 1,3 m utanför L3 i Fack 2. Linjerna parallellt med samlingsskenan har sin 0-punkt vid rakt under L2 i Fack 1, vid $Y=12,5$ m. Den ena går omedelbart utanför L3 i samlingsskenan, vid $X=4,0$ m. Den andra går ca 35 cm utanför manöverskåpen till brytarna, vid $X=13,8$ m. Denna andra linje går i kanten av en tänkt körväg genom ställverket.

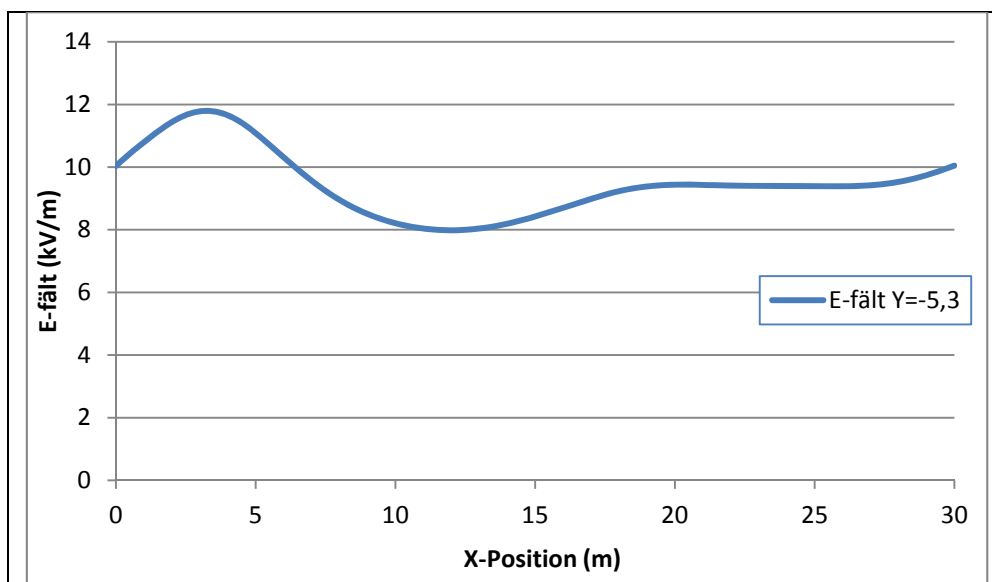
De tre beräknade kurvorna visar på ett område runt $X=3$ och $Y=-4$, där L3 i A-skenan samverkar med L3 i facket. Detta framgår tydligt av Figur 31 och av Figur 32, som visar en mindre del av ställverksområdet. Det maximala värdet ligger något över 14 kV/m och fås i en punkt i stort sett rakt under korsningen mellan L3 i A220 och L3 i Fack 2. Beräkningslinjerna passerar uppenbarligen något utanför detta område med högst beräknad fältstyrka, se Figur 33 - Figur 35.



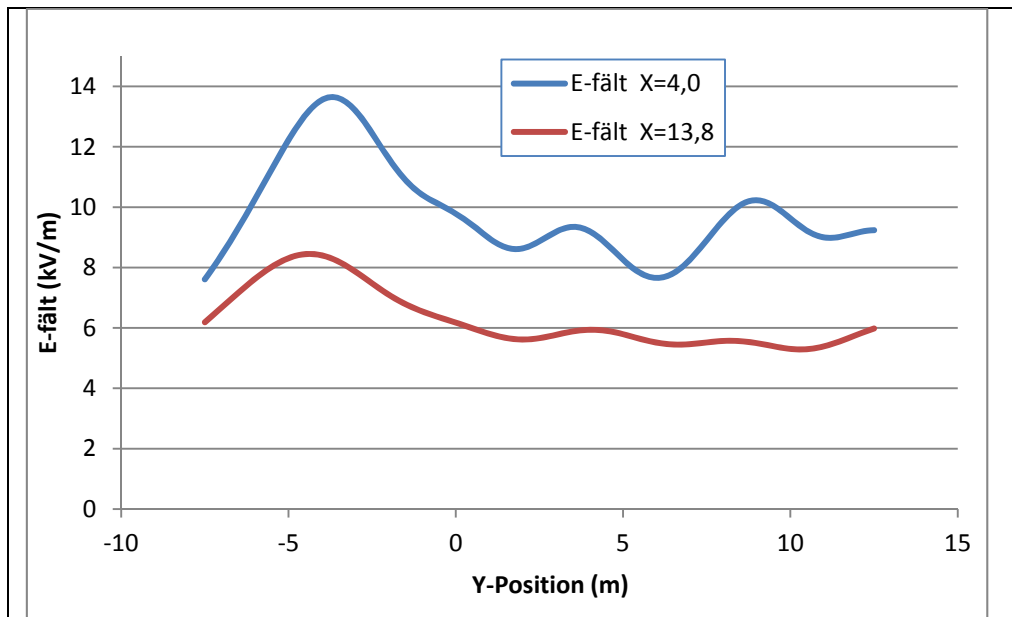
Figur 31. 220 kV. Beräknad fältstyrka på 2 meters höjd.
Färgskala: Rött >12,5 kV/m; Gult >10 kV/m; Violett; >7,5 kV/m;
Grönt >5 kV/m; Blått >2,5 kV/m



Figur 32. 220 kV. Detalj över det lokala maxvärdet. Z = 2,0 m.



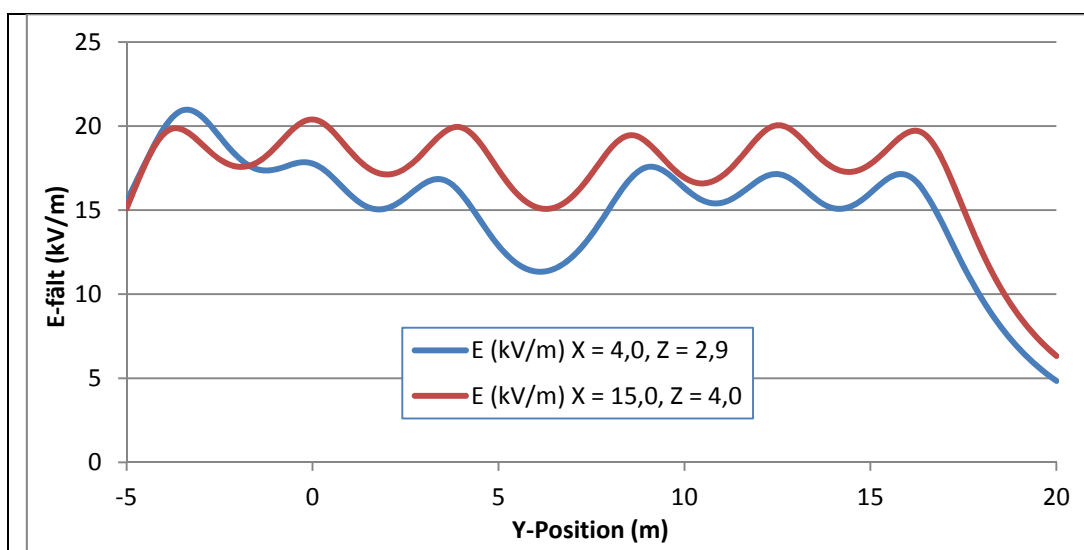
Figur 33. Beräknad fältstyrka längs en linje vinkelrätt samlingsskenorna, vid Y=-5,3 m. Z = 2,0 m. Se Figur 30.



Figur 34. Beräknad fältstyrka längs två linjer parallellt med samlingsskenorna, vid X=4,0 och X=13,8 m. Z = 2,0 m

Fältstyrkan vid närområdets yttre gräns (3,0 m från spänningsförande del) kommer till viss del att vara densamma som på 2 meters höjd ovan mark, eftersom en stor del av skenorna i facken ligger på 4,5 – 5,0 meters höjd.

Riskområdets yttre gräns ligger 1,6 m från spänningsförande del och Figur 35 visar fältstyrkan längs en linje vid X = 4,0 m och vid X = 15,0 m, den förra beräknad för 2,9 meters höjd och den senare för 4,0 m.



Figur 35. Beräknad fältstyrka vid riskområdets yttre gräns. Z = 2,0 m.

Det skall dock igen betonas att dessa beräkningar har gjorts utan hänsyn till jordade stativ mm och dessa kan i allmänhet förväntas ha en begränsande inverkan på fältet. I det utpekade området med högst fältstyrka bör det i verkligheten finnas en vertikal frånskiljare för anslutning upp till samlingsskenan. Frånskiljarens stativ kan antas minska fältstyrkan på lägre höjd och sannolikt öka fältstyrkan på högre höjd. Dessa förändringar kan förmodas vara märkbara inom ett område med en radie på ca 1,5 m räknat från stativet mittpunkt (jämför Figur 16, 420 kV).

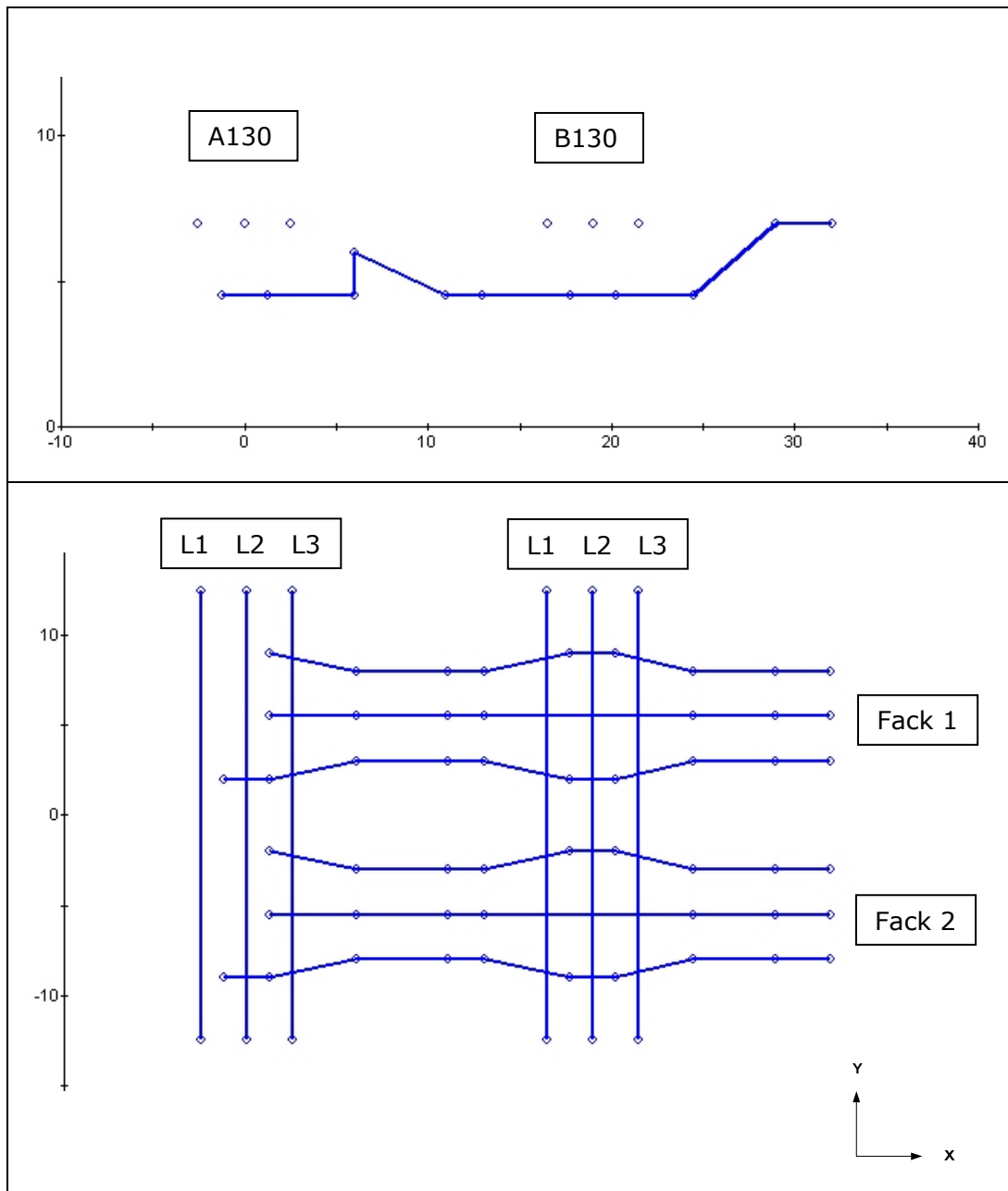
7.1.7 Elektrisk fältstyrka i ett förenklat 130 kV ställverk

130 kV ställverk förekommer i ett stort antal varianter och den som fungerat som underlag till den beräkningsmodell som kom att användas för den analytiska beräkningen skiljer sig tyvärr på flera punkter från den som de verifierande mätningarna sedan gjordes i (se Figur 36). Huvuddragen är dock desamma, fasavstånd, och höjd till ledare mycket lika och det finns därför anledning att redovisa beräkningar från den modell som visas i Figur 37. Det är ett typställverk av ASEA/ABB med två samlingsskenor och två fack och med anslutning på högre höjd till en transformator. Frånskiljarna sitter monterade på samma stativ som samlingsskenorna. Modellen för den analytiska beräkningen är uppbyggd av 58 ledarelement, alla på full spänning. Stativ och annat jordat ingår inte i modellen.

Figur 38 visar den analytiskt beräknade fältstyrkan över ställverket som helhet och Figur 39 och Figur 40 visar fältstyrkan längs linjer genom de två områdena med högst fältstyrka.

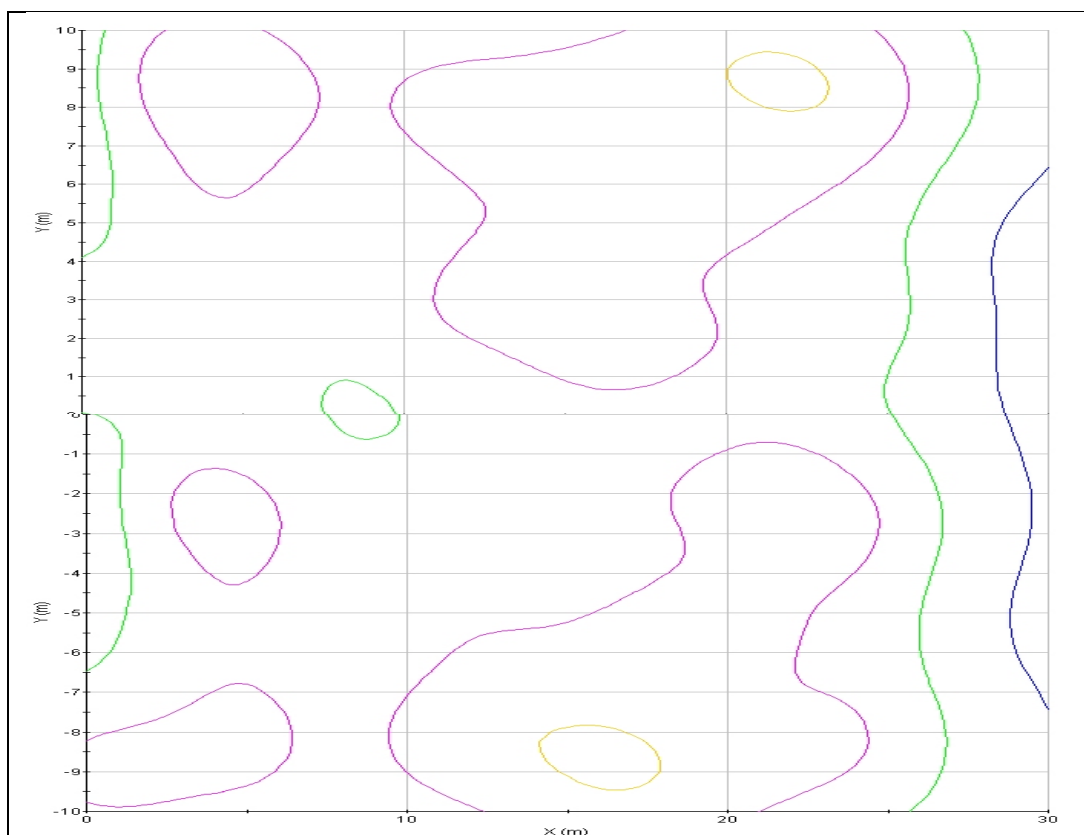


Figur 36. 130 kV. Samlingsskena till höger, ett ledningsfack i förgrunden och ett transformatorfack i bakgrunden.

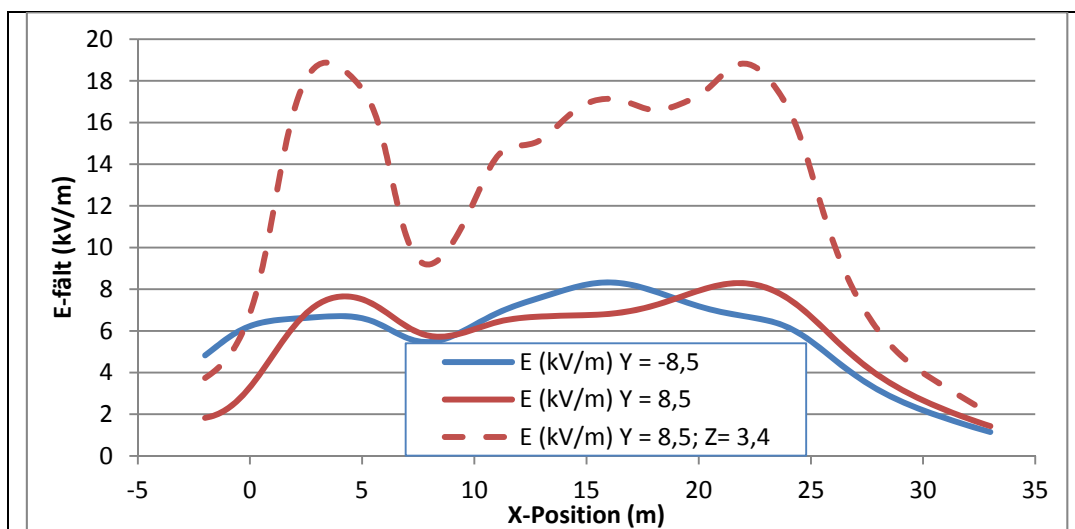


Figur 37. Förenklat 130 kV ställverk. Sektion överst, layout nederst.

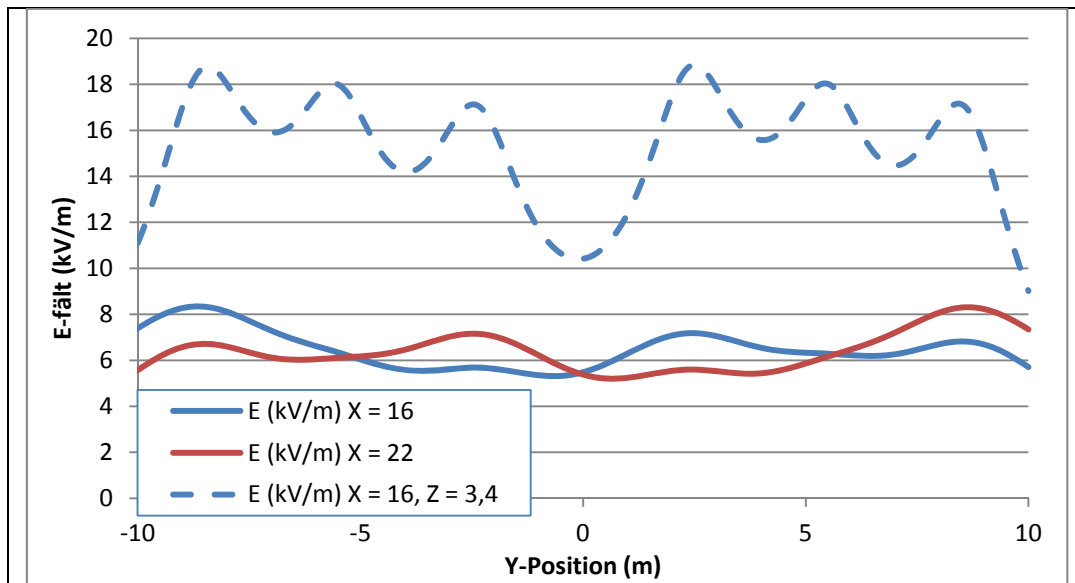
Lokala maxvärden fås som tidigare där fältet från en fas i samlingsskenan sammanlagras med fältet från motsvarande fas i respektive fack.



Figur 38. Beräknad fältstyrka över det modellerade ställverksområdet.
Färgskala: Gult >8 kV/m; Violett >6 kV/m; Grönt >4 kV/m; Blått >2 kV/m.



Figur 39. Beräknad fältstyrka för 130 kV. Linjer vinkelrätt samlingsskenan.
Streckad linje beräknad för Z = 3,4 m, d v s motsvarande riskavståndets yttre gräns. Övriga linjer beräknade vid Z = 2 m.



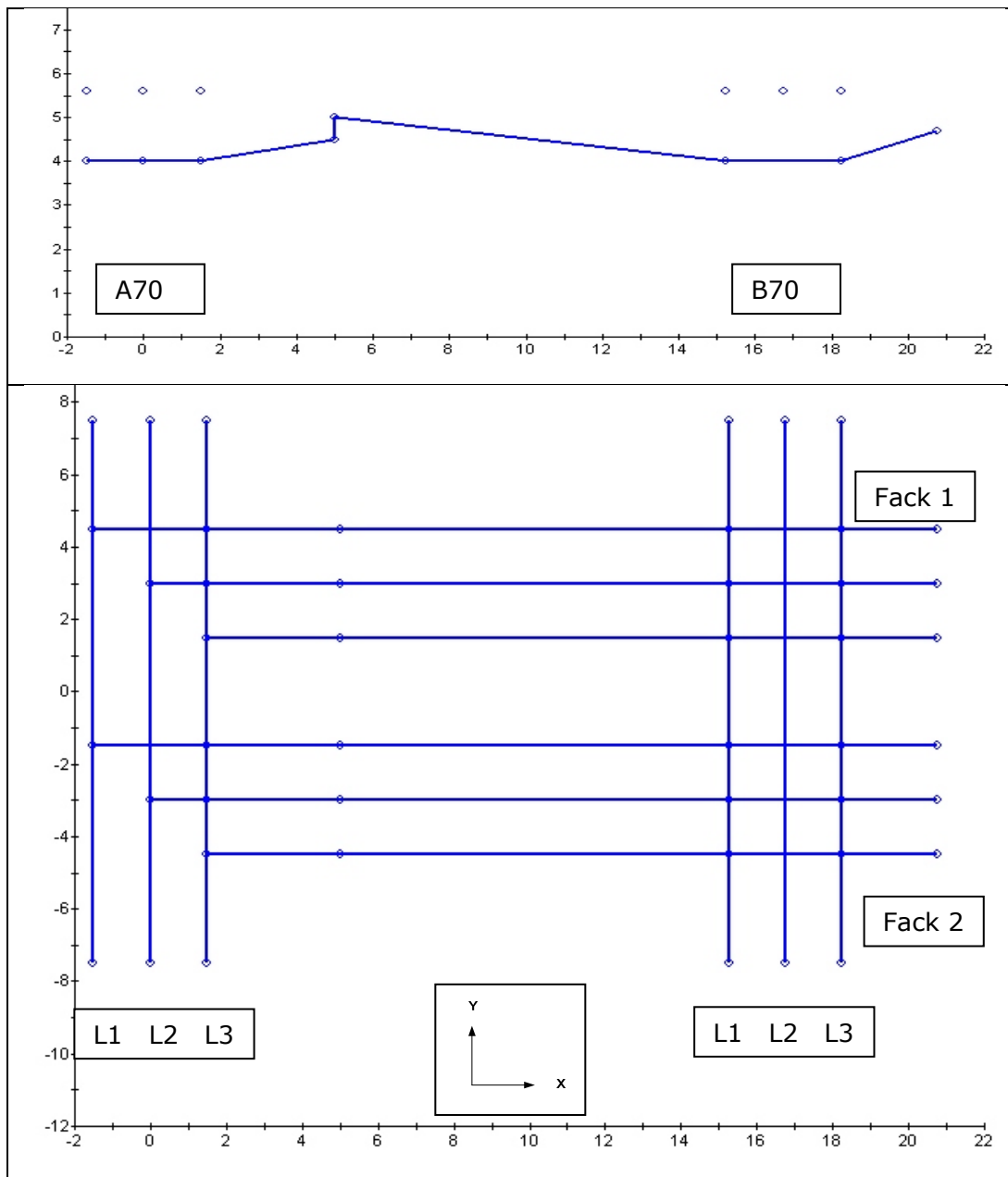
Figur 40. Beräknad fältstyrka för 130 kV. Linjer parallellt med samlings-skenan. Streckad linje beräknad för $Z = 3,4$ m, d v s motsvarande riskavståndets yttre gräns. Övriga linjer beräknade vid $Z = 2$ m.

Den analytiska beräkningen har i detta fall kompletterats med en omfattande numerisk beräkning i 3D med hjälp av Comsol Multiphysics. Resultat från denna beräkning och kommentarer till skillnaden mellan beräknade och uppmätta värden ges i avsnitt 8.5.

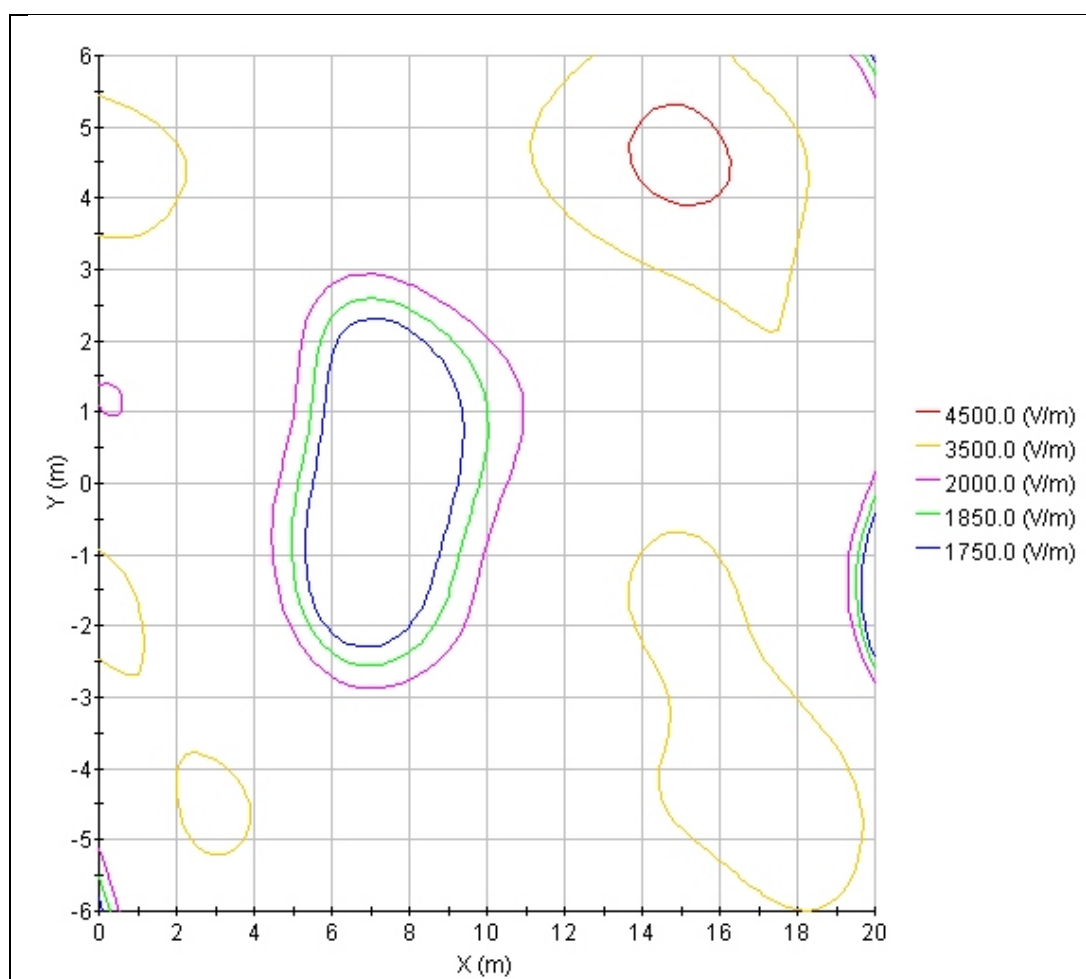
7.1.8 Elektrisk fältstyrka i ett förenklat 70 kV ställverk

Ställverk för 70 kV förekommer tämligen sparsamt och därför har beräkningsmodellen baserats enbart på ett ritningsunderlag, utan någon uppföljning i verklig anläggning. Några verifierande mätningar har inte heller ägt rum. Modellen i Figur 41 visar en mindre del av ett ställverk med två fack med kabelanslutningar och två samlingskenor.

Figur 42 visar den beräknade fältstyrkan för den aktuella delen av ställverket. Högst värden fås som tidigare där ledarna i samlingskena och fack samverkar, men nivåerna är förhållandevis låga. Endast ett mindre område, markerat med rött i Figur 42, uppvisar värden större än $4,5$ kV/m. Figur 43 och Figur 44 visar fältstyrkan längs bl a $Y = 4,5$ och $X = 15$, som båda går igenom detta maxområde. Kurvorna är tämligen flacka och pendlar i allmänhet mellan 2 och 4 kV/m.

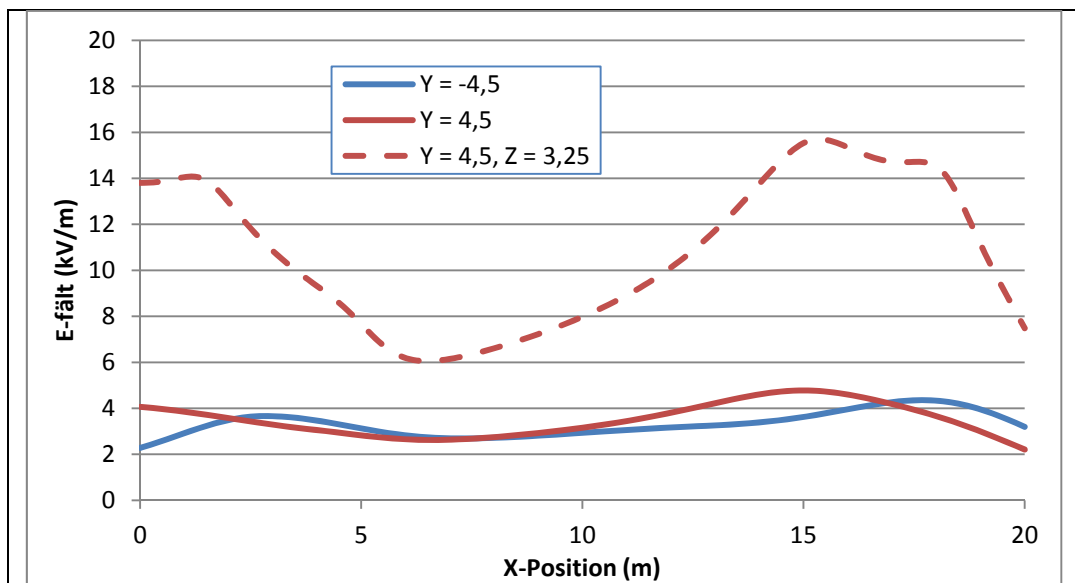


Figur 41. Sektion överst och plan nederst visande beräkningsmodellen för 70 kV. Höjdskillnaden vid X = 5 m kommer från en vertikal brytare.

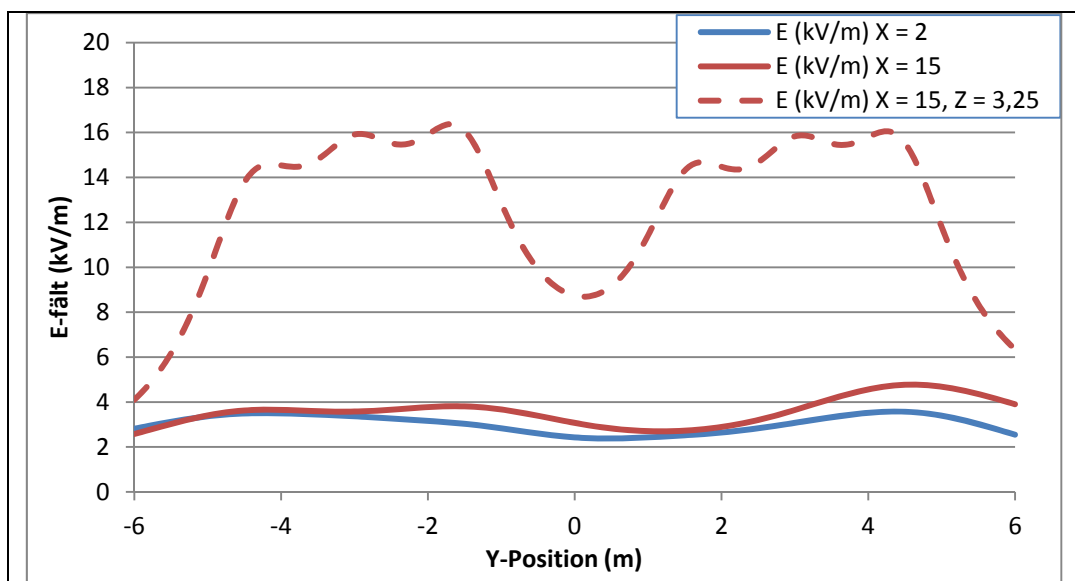


Figur 42. Beräknad fältstyrka 70 kV. Beräkningshöjd 2 m. Max fältstyrka (4,8 kV/m) fås där fältet från B-skenan sammanlagras med fältet från Fack 1.

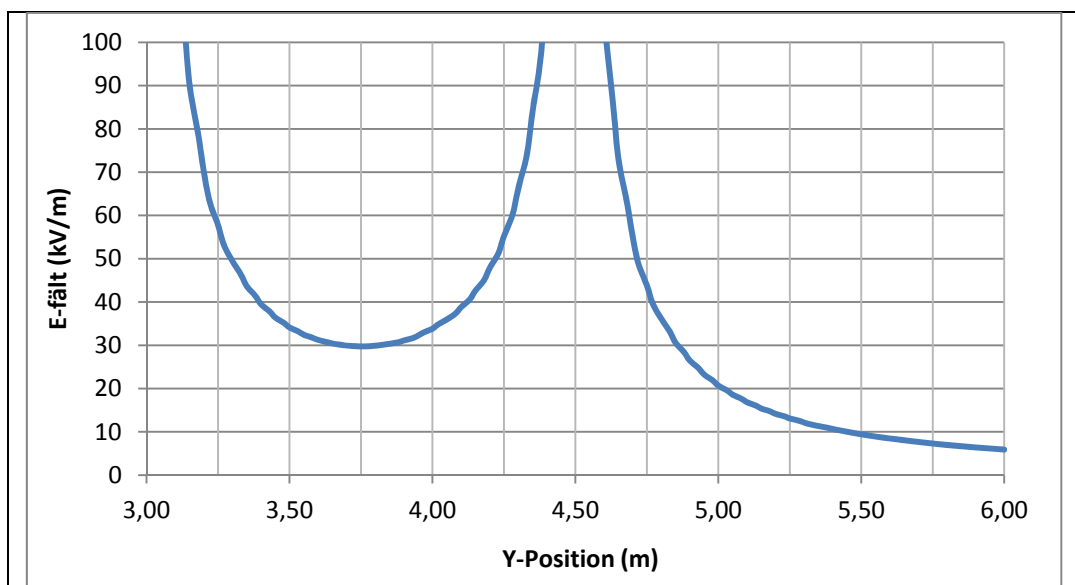
Avståndet till riskområdets yttre gräns är vid denna spänningsnivå 0,75 m, vilket med en lägsta ledarhöjd på 4,0 m, ger en höjd ovan mark $Z = 3,25$ m. I Figur 43 och Figur 44 finns två kurvor beräknade för denna höjd. Den maximala fältstyrkan når i dessa fall upp till ca 16 kV/m, med högsta värden under respektive samlingsskena. Högre fältstyrkor fås i området mellan fasledarna. Figur 45 visar en beräkningslinje som korsar Fack 1 vid $X = 3,25$ och på samma höjd som fasledarna ($Z = 4,25$ m). Maxfältet mellan faserna är ca 30 kV/m och ca 13 kV/m fås utanför ytterfasen. Punkten mellan fasledarna är måhända mer av akademiskt intresse än som en möjlig arbetsposition. Det ringa fasavståndet begränsar rörelsefriheten och det är bättre att i så fall välja en position något under ledarna.



Figur 43. Beräknad fältstyrka 70 kV. Linjer vinkelrätt samlingsskenan. Streckad linje beräknad för $Z = 3,25$ m, motsvarande riskområdets yttre gräns. Övriga linjer beräknade vid $Z = 2$ m.



Figur 44. Beräknad fältstyrka 70 kV. Linjer parallellt med samlingsskenan. Streckad linje beräknad för $Z = 3,25$ m, motsvarande riskområdets yttre gräns. Övriga linjer beräknade vid $Z = 2$ m.



Figur 45. Beräknad fältstyrka längs en linje genom fasledarna vid $X = 3,25$ m och $Z = 4,25$ m.

7.2 Magnetisk flödestäthet

Att göra rimliga uppskattningar av den magnetiska flödestätheten för en ställverksmodell är matematiskt lättare än motsvarande för den elektriska fältstyrkan, så länge som man bortser från stålets inverkan på flödestätheten. Valet av indata, d v s ström, är dock betydligt mer osäkert. Strömmen är till skillnad från spänningen långt ifrån konstant och ställverkens märkströmmar är tilltagna för att även klara extraordinära driftfall. Att bara utgå från märkströmmarna skulle därmed ge mycket konservativa rekommendationer om minsta arbetsavstånd. I detta avsnitt görs i stället en bedömning baserad på märkström, men kompletterad med vad som kan antas vara en mer rimlig driftström. Då flödestätheten är direkt proportionell mot strömmen blir omräkningar av detta slaget mycket enkla.

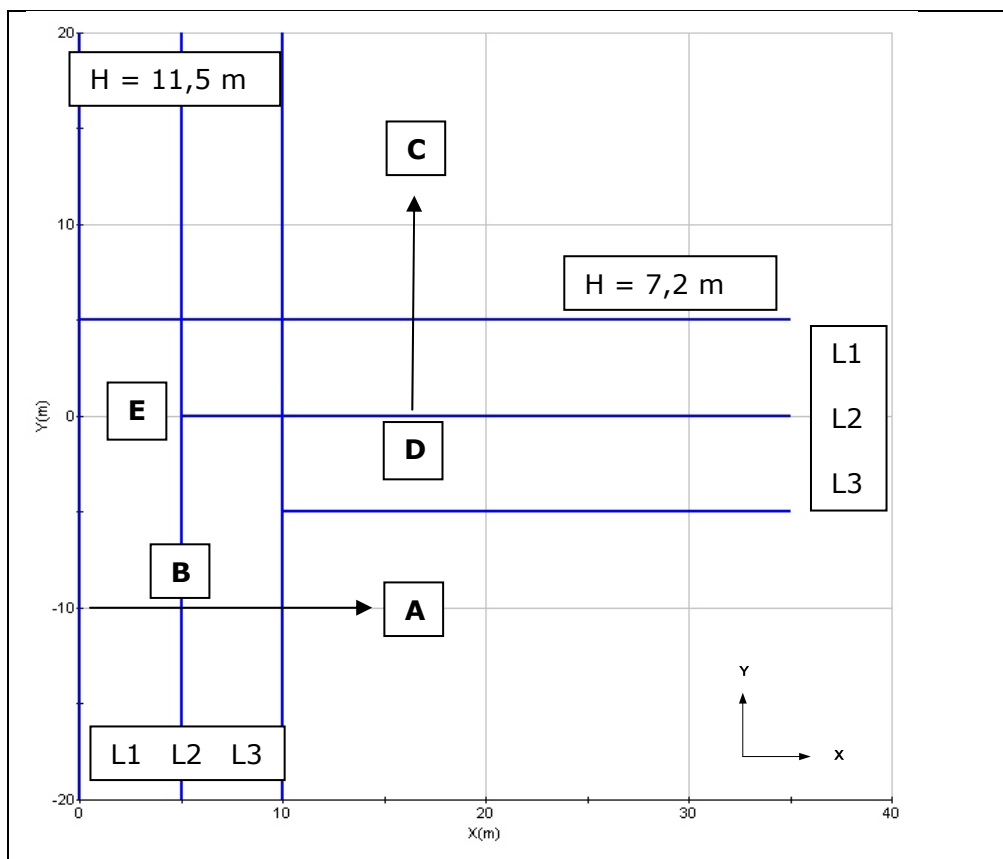
Ställverken är i princip uppbyggda av raka 3-fasiga ledarsektioner och fasta avgreningar i rät vinkel från dessa. Flödestätheten blir högst i de positioner där fälten från de två ledararrangemangen förstärker varandra, vilket innebär att det räcker med att närmare studera ett område runt dessa avgrekningspunkter. Fältet från de raka sektionerna kan behandlas för sig, liksom fältet från själva knutpunkterna.

Nedan ges en lite mer utförlig redovisning för en geometri motsvarande ett 420 kV ställverk av senare design, följt av mer summariska redovisningar för 220, 130 och 70 kV.

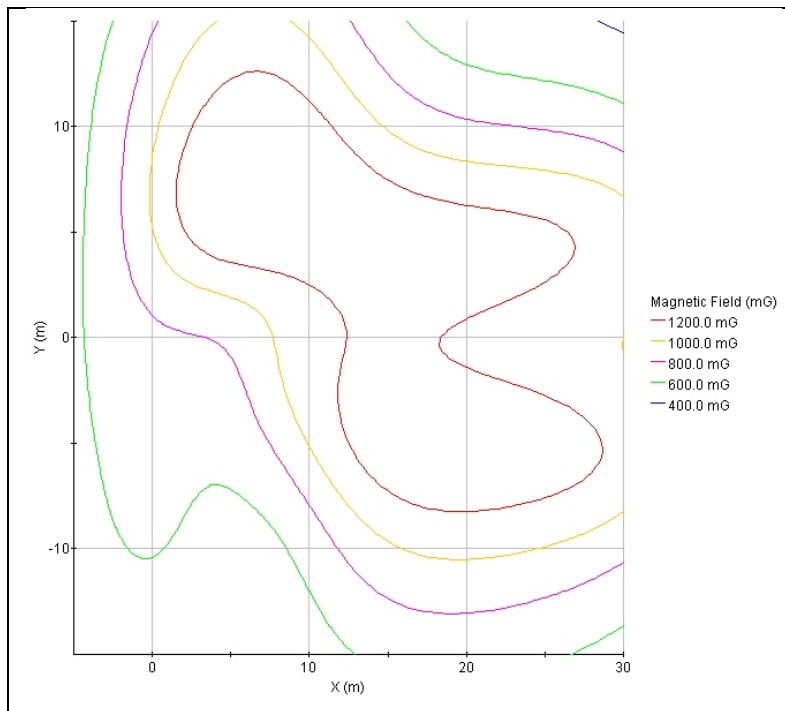
Figur 46 visar den enkla beräkningsmodellen med bara sex ledarelement. I modellen finns ingen kontakt mellan samlingsskenan på 11,5 meters höjd ovan mark och ledarna i facket på 7,2 meters höjd, men fackets ledare är utdragna horisontellt till en position motsvarande hela slackens längd. Detta innebär att det beräknade fältet under slacken kommer att bli något för högt

jämfört med det sanna värdet. Flödestätheten har sedan beräknats för ett antal plan, bl a ett horisontellt plan 2 m ovan mark ($Z = 2,0$ m) och för fem linjer, A – E i Figur 46. Linje A är horisontell och i samma höjd som samlingsskenan. Linje B går vertikalt upp mot mittfasen i samlingsskenan. Linje C är horisontell och i samma höjd som ledarna i facket. Linje D går vertikalt upp mot mittfasen i facket. Linje E går vertikalt upp mot knutpunkten mellan mittfaserna i samlingsskena och fack.

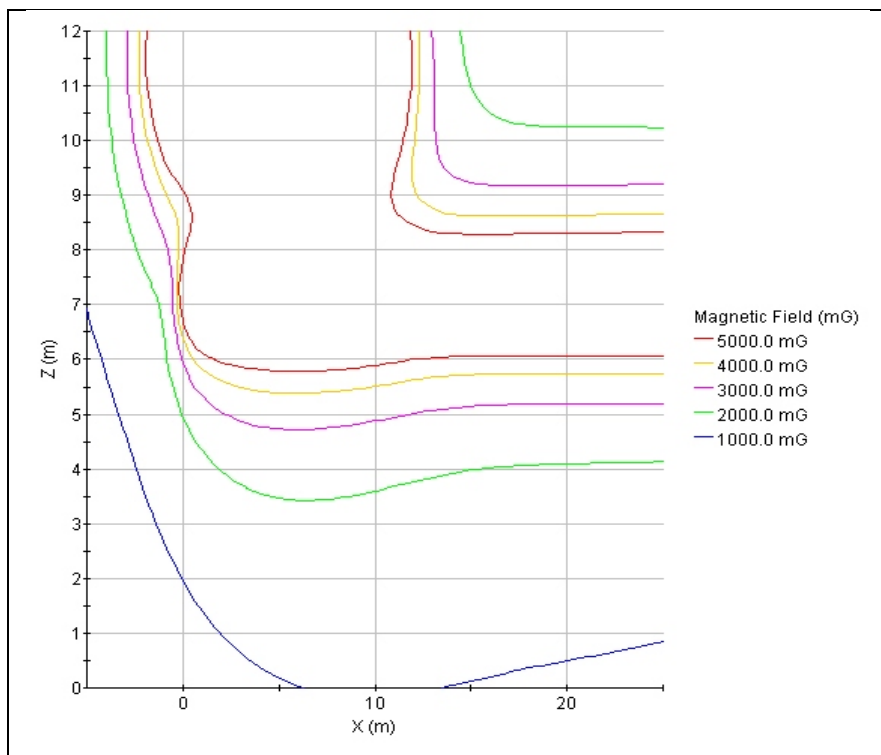
Figur 47 visar den beräknade flödestätheten för den centrala delen av samma område som i Figur 46 och för 2 meters höjd. Vid beräkningarna har strömmen i samlingsskenan antagits vara 6 000 A och strömmen i facket 3 150 A, dvs 100 % av märkström i båda fallen. Inom det oregelbundet formade området med högst flödestäthet finns lokala maxvärden på ca 1500 mG (=150 μ T).



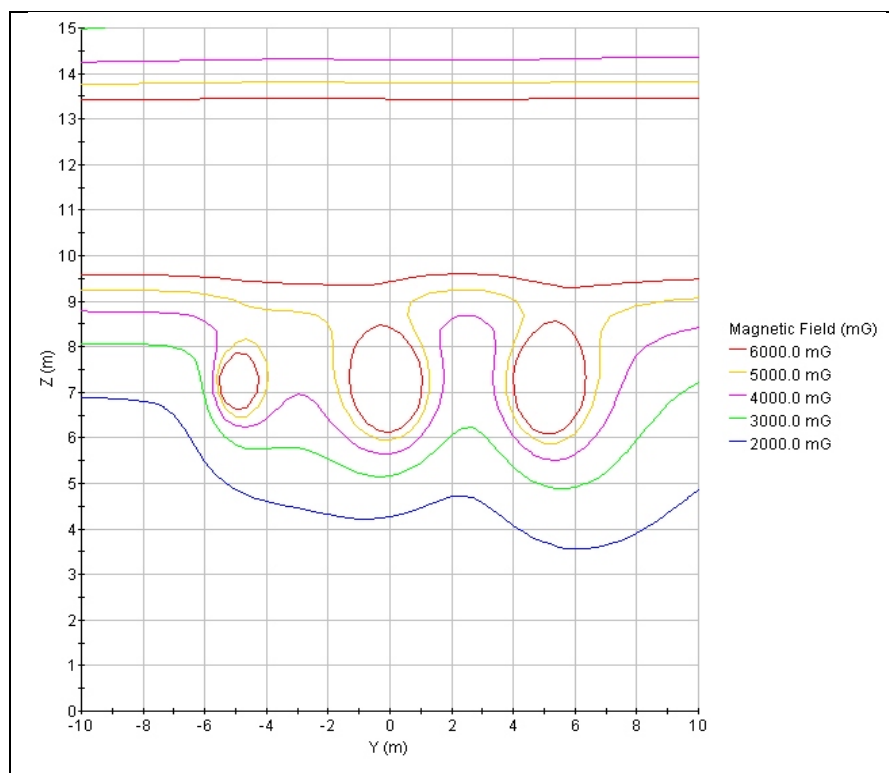
Figur 46. Detalj av ett 420 kV ställverk av senare design med en samlingsskena och ett fack. Samlingsskenan ligger på 11,5 m höjd ovan mark och ledarna i facket på 7,2 meters höjd. A – E är beräkningslinjer.



Figur 47. Magnetisk flödestäthet 420 kV. Beräknat med 6000 A i samlings-skenan och 3150 A i facket. Beräkningshöjd $Z = 2,0$ m. $1000 \text{ mG} = 100 \mu\text{T}$.



Figur 48. Beräknad flödestäthet för ett X-Z plan vid $Y = 5,5$ m. $1000 \text{ mG} = 100 \mu\text{T}$.



**Figur 49. Beräknad flödestäthet för ett Y-Z plan vid $X = 10$ m.
1000 mG = 100 μ T.**

Figur 48 och Figur 49 visar flödestätheten i två lodräta snitt, vid $Y = 5,5$ m respektive $X = 10$ m. De ger en bra bild hur fältet ser ut runt de båda skensystemen i olika plan, men lämpar sig inte så bra för att bestämma fältets nivå på ett visst avstånd. För detta lämpar sig beräkningslinjerna A - E över fältets utbredning bättre.

I Tabell 17 ges en sammanfattning av det magnetiska fältets utbredning för 70 - 420 kV, i huvudsak baserad på dessa beräkningslinjer. I tabellen redovisas avståndet från närmsta ledare till den punkt där flödestätheten understiger 500 μ T (= insatsvärdet för arbetstagare). Den komplicerade fältbilden vid övergången mellan skena och fack gör att dessa avstånd sprider kraftigt. Från ett kort avstånd räknat rakt under den punkt där ledaren i facket slutar, till längre avstånd räknat från samlingsskenan. Fältet vid riskområdets yttre gräns redovisas likaså. Även i detta fall är spridningen stor, dock lite mindre eftersom detta avstånd vanligen är större än avståndet till < 500 μ T. I fjärde kolumnen redovisas fältet 2 m ovan mark. Värdet för övergången mellan skena och fack kan möjligen vara något för högt, då den förenklade formen på fackets ledare har betydelse i denna punkt.

Värdena i tabellen har beräknats med full märkström, vilket motsvarar ett ovanligt belastningsfall. Detta till trots är flödestätheten 2 m ovan mark under 500 μ T och endast i ett par fall når den upp till 200 μ T. En mer rimlig belastning, sett till alla spänningsnivåerna, kan möjligen vara 50 % av märkström. Detta ger värden som endast i ett par fall når upp till 100 μ T och vanligen ligger i området 50 - 75 μ T.

Arbete utanför riskområdets yttre gräns skall enligt tabellen endast i undantagsfall kunna innebära exponering för fält överstigande 500 μT . Generellt fås högre fält från de tungt belastade samlingsskenorna, än vid arbete i facken. Vid 50 % av märkström, som är en mer rimlig belastning, kommer fältet vid riskområdets gräns att ligga väl under 500 μT .

Avståndet till den gräns där B-fältet understiger 500 μT är i allmänhet av samma storleksordning som avståndet till riskområdets yttre gräns.

Arbete innanför riskområdets yttre gräns kan medföra exponering över insatsvärdet 500 μT , men sådant arbete blir endast aktuellt vid Arbete Med Spänning och särskilt då vid arbete med Barhandsmetoden. I dessa fall kan arbetaren befinna sig på bara någon decimeters avstånd från ledaren och därtill vara ännu närmare med armar och händer.

Källa för B-fältet / Belastning i A	Avstånd till B-fält < 500 μT (m)	B-fält vid riskområdets yttre gräns (μT) / Avstånd (m)	B-fält 2,0 m ovan mark (μT)
Skena 420 kV / 6 000 A	2,0 – 2,5	350 – 450 / 2,8	90
Fack 420 kV / 3 150 A	1,3 – 1,4	225 – 250 / 2,8	100
Övergång skena-fack 420 kV / 6 000 A / 3 150 A	0,8 – ca 3,5	250 / 2,8	150
Skena 220 kV / 5 000 A	1,5 – 2,1	500 – 650 / 1,6 1000 μT i området mellan faserna	90
Fack 220 kV / 2 500 A	1,1 – 1,3	325 – 450 / 1,6	200
Övergång skena-fack 220 kV / 5 000 A / 2 500 A	0,6 – ca 2,5	250 / 1,6	190
Skena 130 kV / 2 500 A	0,9 – 1,1	350 – 475 / 1,1	70
Fack 130 kV / 1 600 A	0,6 – 0,7	240 – 300 / 1,1	120
Övergång skena-fack 130 kV / 2 500 A / 1 600 A	0,4 – ca 1,3	250 / 1,1	130
Skena 70 kV / 2 500 A	0,8 – 1,1	500 – 660 / 0,75	80
Fack 70 kV / 1 600 A	0,6 – 0,7	300 – 425 / 0,75	100
Övergång skena-fack 70 kV / 2 500 A / 1 600 A	0,6 – ca 1,2	425 / 0,75	140

Tabell 17. Beräknad magnetisk flödestäthet 70 – 420 kV.

För de speciella fallen, med arbete mycket nära en fas, rekommenderas att fältets storlek enkelt uppskattas som fältet från en lång rak ledare, med Biot-Savarts lag enligt:

$$B = \frac{0,2 \times \text{Fasströmmen}}{\text{Avståndet}}$$

Med Fasströmmen i Ampere och Avståndet i meter fås flödestätheten B i μT .

För arbete på något längre avstånd, med isolerstång, visar andra och tredje kolumnerna att flödestätheten kan nå upp till 500 μT , men då endast i något enstaka fall och vid 100 % av märkström.

8 Mätningar och bedömning mot beräknade värden

8.1 Instrument

Elektriska och magnetiska fält under kraftledningar och på 1–2 meters höjd i ställverk 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 alternativt dator via optisk fiber samt med loggerfunktion för automatisk mätning och lagring av data i själva mätinstrumentet. Instrumentet kan kommunicera med handenheten 8053, med en handdator typ HP iPAQ hx2190 eller med en vanlig PC. Nödvändiga inställningar görs via handenheten alternativt via datorn. Handenhet 8053 och vanlig PC möjliggör registrering av fältet i tre riktningar, medan med handdatorn fås endast det totala fältet. Viktigare data för EHP 50-C ges nedan:

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 och vikt:	92 x 92 x 109 mm. 525 gram	
Drifttid:	> 10 timmar vid normal drift > 150 timmar vid lågeffekt drift	
Kommunikation:	Via Optisk fiber, maximalt 80 m	

Vid mätningarna i ställverken placerades mätproben på ett isolerat stativ, vanligen 2,0 m ovan mark, men i vissa fall på något högre höjd.

Mätning av fält kräver koncentration och kritiskt tänkande. Felkällor finns och det gäller att redan vid mättillfället bedöma om uppmätta värden är realistiska eller ej.

Mätningarna i ett 420 kV ställverk av senare konstruktion blev mer omfattande än de övriga och kom att lämpa sig bäst för en jämförelse mellan uppmätta och beräknade värden. Resultatet från denna jämförelse har sedan använts som stöd vid beräkning av fältet i de övriga ställverkstyperna.

8.2 Mätning i ett 420 kV ställverk av senare konstruktion

Den 26 och 27 augusti 2009 gjordes en serie mätningar av den elektriska fältstyrkan i ett 420 kV ställverk av senare konstruktion, d v s ett kompakt ställverk med s k frånskiljande brytare. Mätningar gjordes på 2 meters höjd längs fyra linjer och längs en linje på 1 och 2 meters höjd. Därtill gjordes ett antal punktmätningar på 0,5 – 3 meters höjd. Alla dessa mätningar genomfördes i eller i anslutning till ett ytterfack i ställverket.

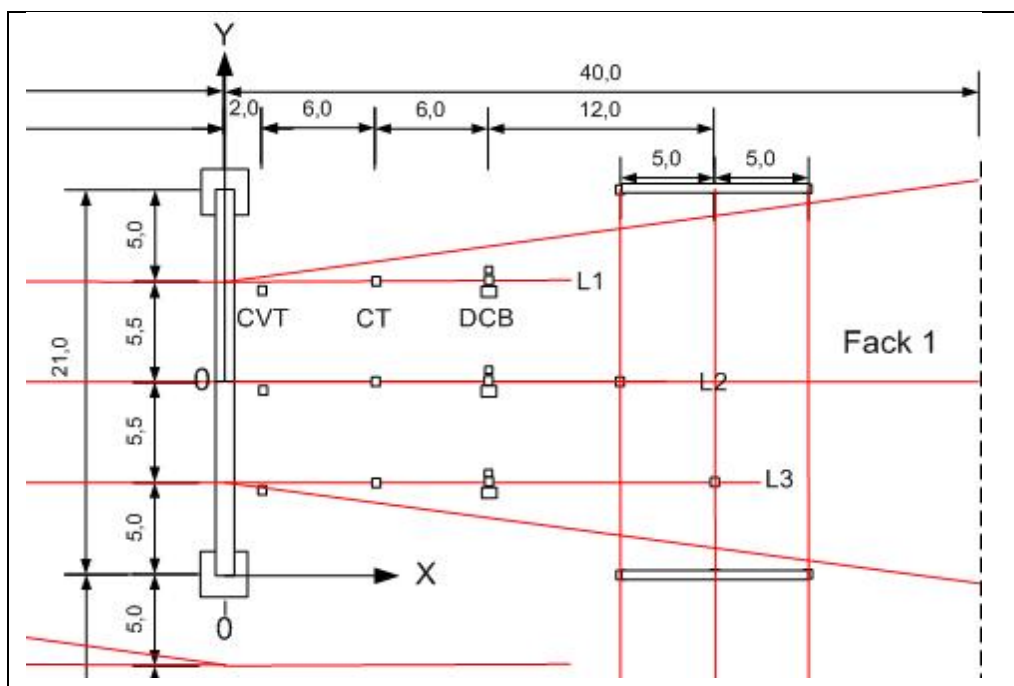
Figur 50 visar huvuddragen av Fack 1 - ett ledningsfack. Detta är identiskt med Fack 1 i det typställverk som visas bl a i Figur 8 och Figur 9. Figur 51 - Figur 58 visar mätresultat och beräknat totalfält. Beräkningarna har gjorts med EPRI-programmet och med en modell med stativ mm enligt Figur 17.

En jämförelse av kurvorna för det totala fältet (de ljus- och mörkblå kurvorna) visar att det beräknade fältet är oftast för lågt och att avvikelser blir större när de horisontella komponenterna blir större. Slutsatsen blir att den enkla beräkningsmetoden inte förmår att ta full hänsyn till de jordade strukturer som så kraftigt påverkar det lokala fältet och framförallt de horisontella komponenterna.

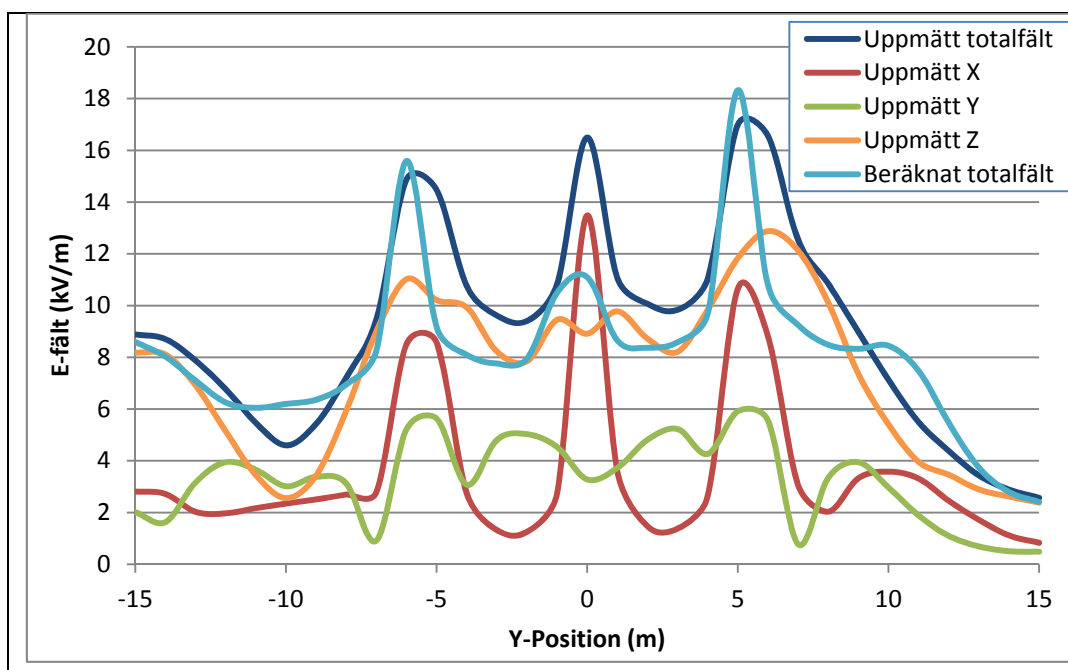
De stora avvikelserna mellan beräknade och uppmätta värden väcker frågan om det verkligen är värt besväret att ta hänsyn till stativ och andra jordade föremål. Figur 18 visade på skillnaden mellan fyra beräkningsfall; utan stativ, utan stativ men med detaljer på ström- och spänningstransformatörer, med stativ men utan dessa extra detaljer samt slutligen med stativ och extra detaljer. Figuren visar att kurvan för den enklare beräkningen utan stativ men med detaljer på ström- och spänningstransformatörer ligger till största delen över motsvarande för med stativ. De höga topparna mitt för stativen finns inte med men i övrigt synes beräkningen ge ett konservativt mått på fältet.

Figur 59 - Figur 62 visar en jämförelse mellan uppmätt totalfält i Fack 1 och motsvarande beräknade värden med och utan stativ och det är uppenbart att beräkningen utan hänsyn till stativ mm (gröna kurvor) inte förmår ge en korrekt bild av fältstyrkan nära stativen. I övrigt stämmer också bilden att den enklare beräkningen, utan stativ, i allmänhet ger ett mer konservativt resultat än med stativ.

Detta resultat stöder valet att bortse från stativen vid beräkningarna för 70, 130 och 220 kV. Beräkningsarbetet blir på detta sätt enklare, går fortare och ger i allmänhet ett konservativt resultat. Stativens mer lokala påverkan måste man dock se upp med.



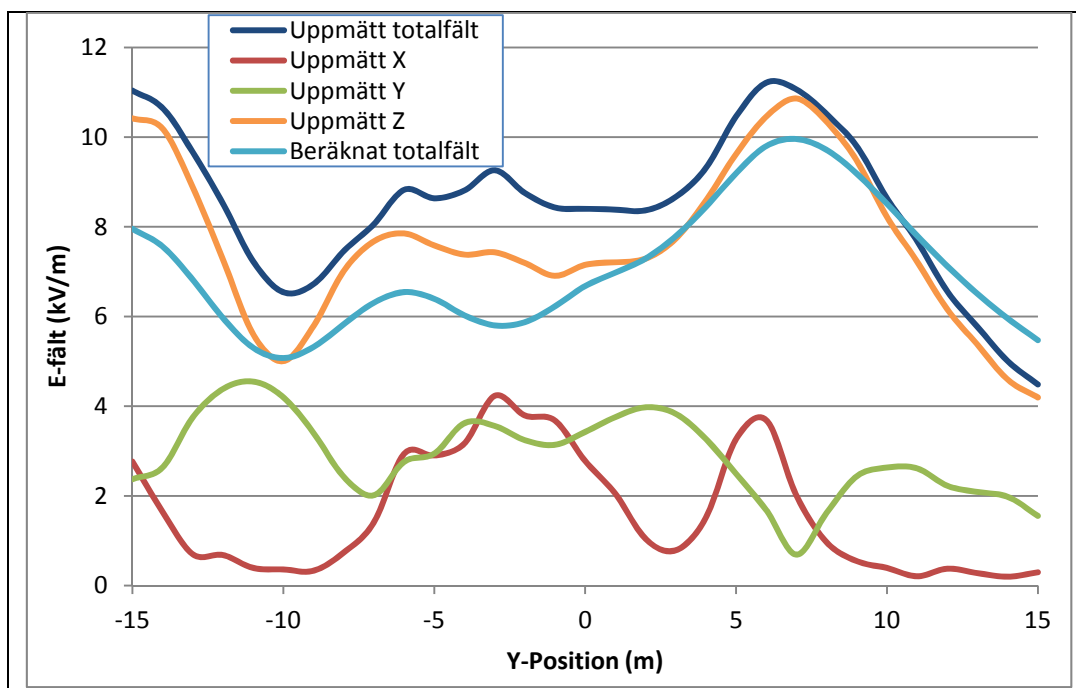
Figur 50. 420 kV av senare konstruktion. Plan över Fack 1.



Figur 51. 420 kV av senare konstruktion.

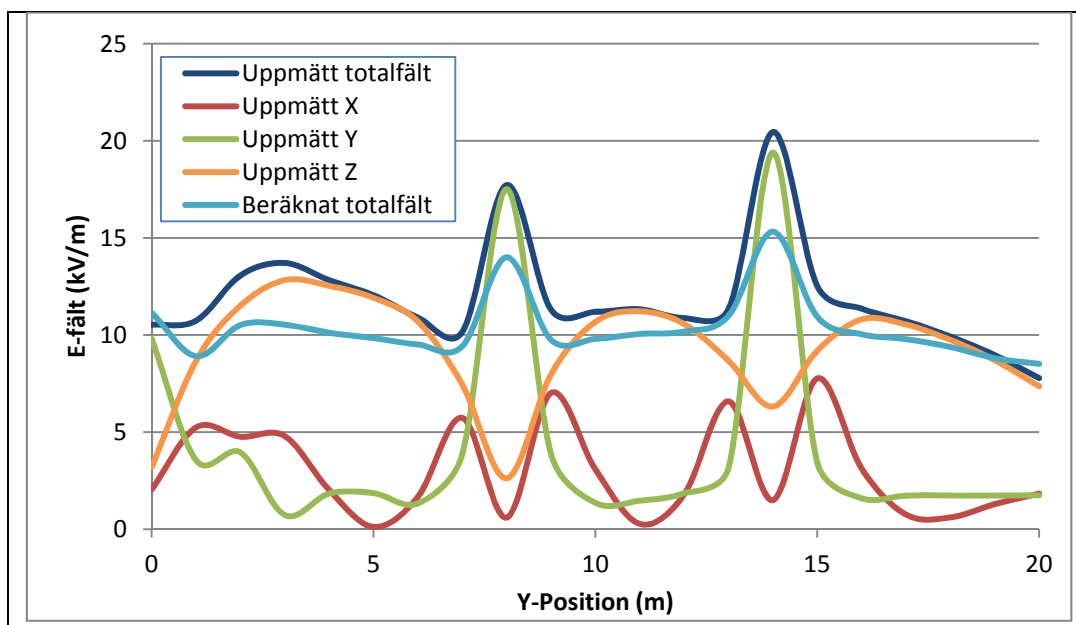
Linje A: X=2,5, Z=2,0, Y=-15- -15 m.

X och Y är horisontella komponenter, Z är vertikal.



Figur 52. 420 kV av senare konstruktion.

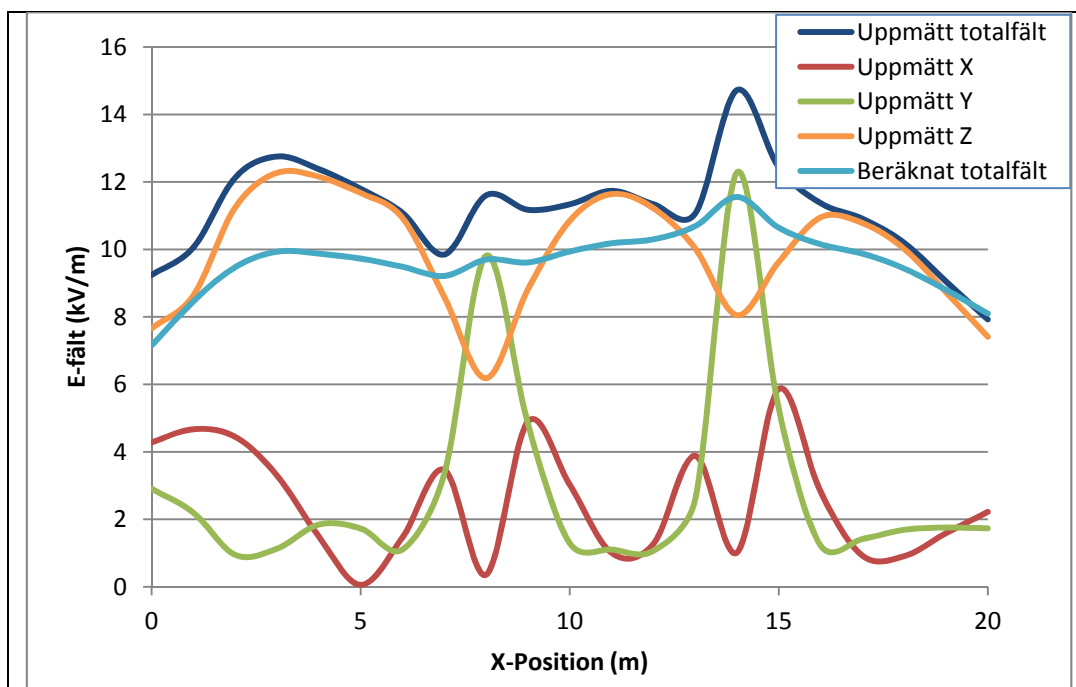
Linje C: X=10,0, Z=2,0, Y=-15 -15 m. Ett elskåp ca 0,7 m från mätlinjen och mellan Y=-1,0 och Y=-1,4 påverkar fältet i X-riktning.
X och Y är horisontella komponenter, Z är vertikal.



Figur 53. 420 kV av senare konstruktion.

Linje F: Y=6,0, Z=2,0, X=0 - - 20 m.

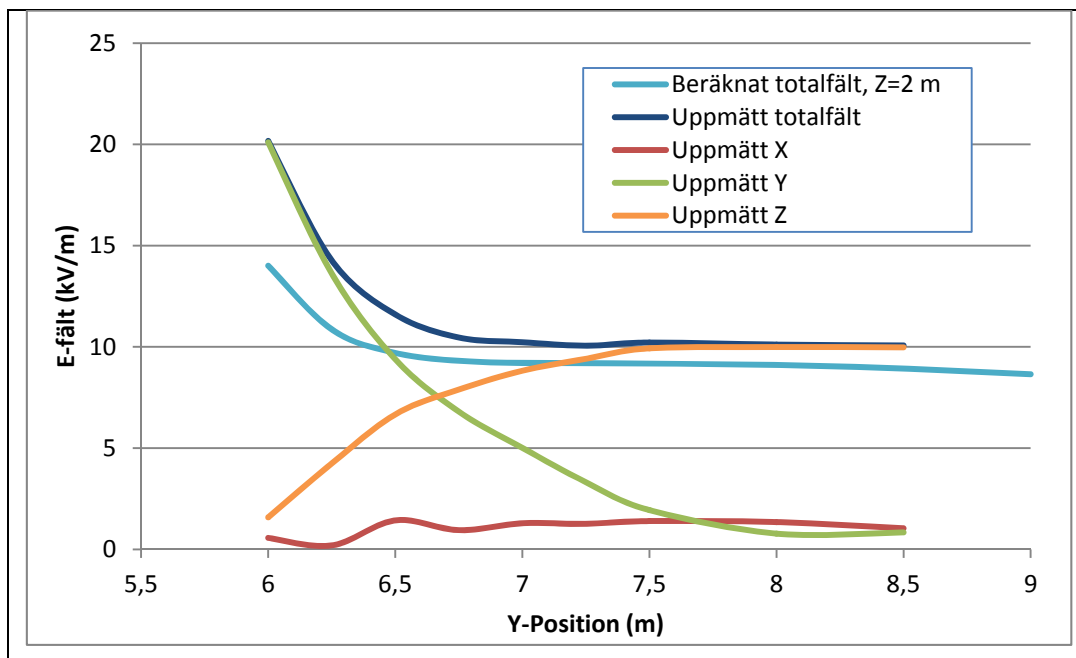
X och Y är horisontella komponenter, Z är vertikal.



Figur 54. 420 kV av senare konstruktion.

Linje G: Y=6,5, Z=2,0, X=0 -- 20 m.

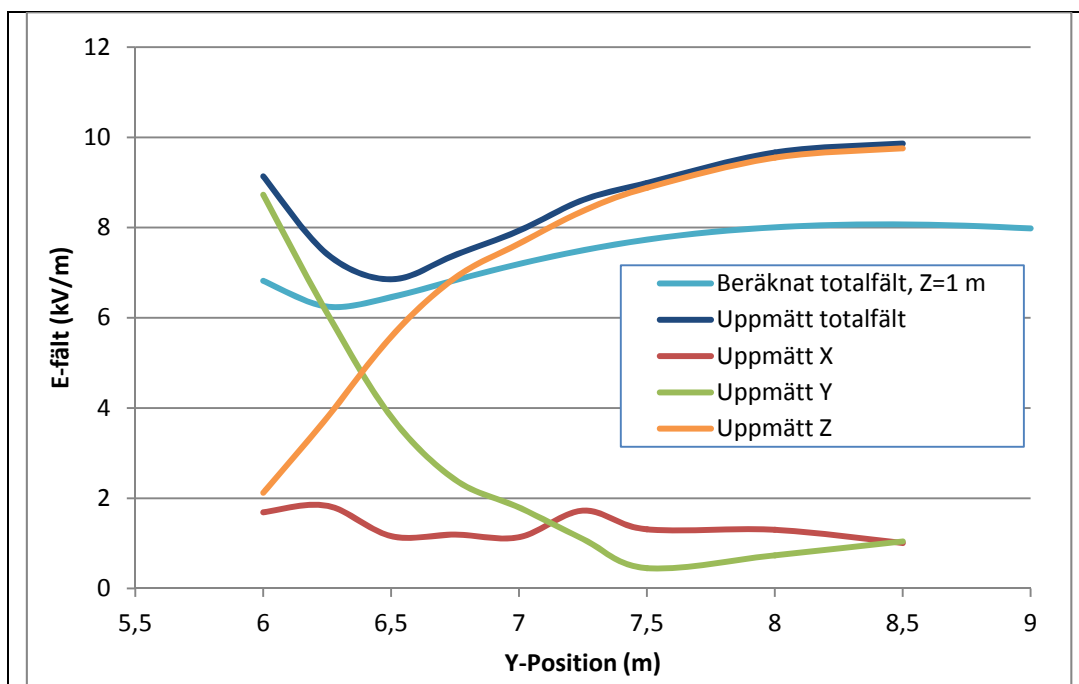
X och Y är horisontella komponenter, Z är vertikal.



Figur 55. 420 kV av senare konstruktion.

Linje H: X=8,0, Z=2,0, Y=6,0 -- 9,0 m.

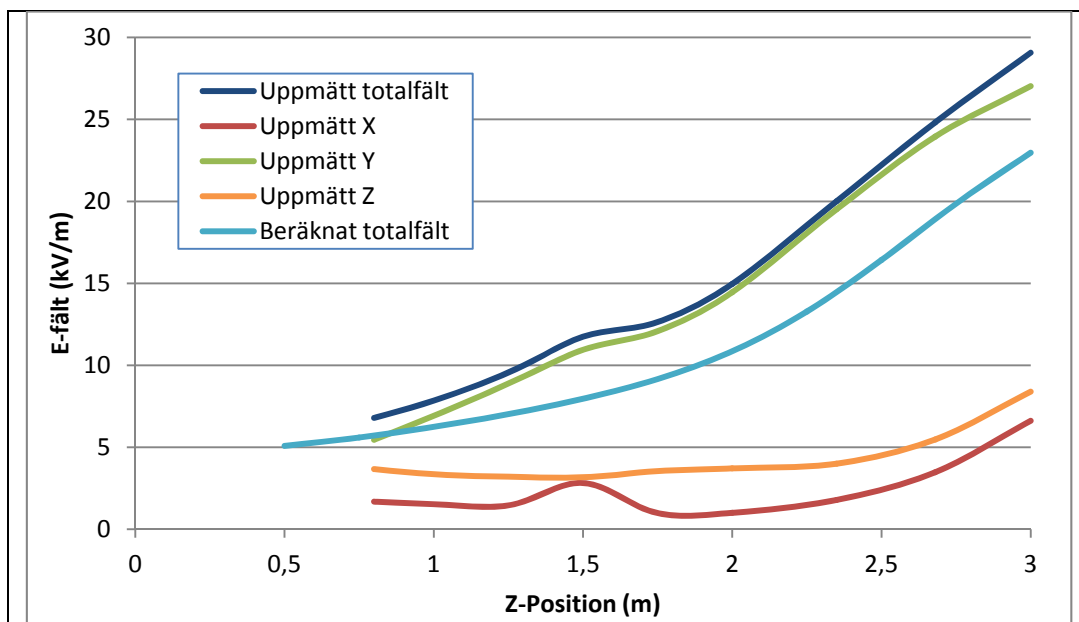
X och Y är horisontella komponenter, Z är vertikal.



Figur 56. 420 kV av senare konstruktion.

Linje H: X=8,0, Z=1,0, Y=6,0 -- 9,0 m.

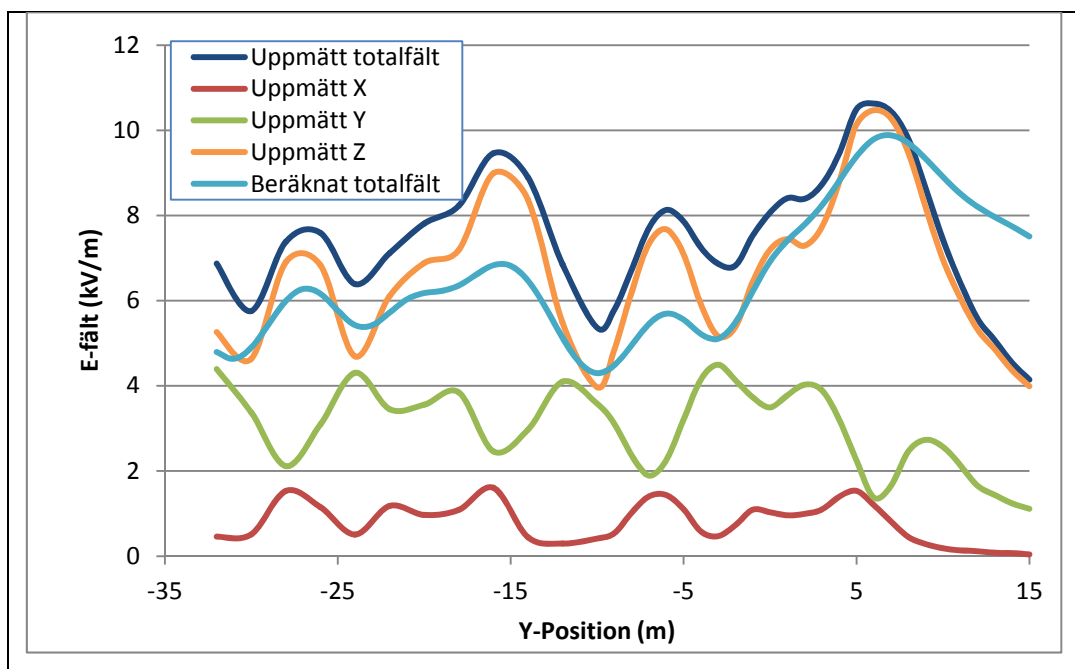
X och Y är horisontella komponenter, Z är vertikal.



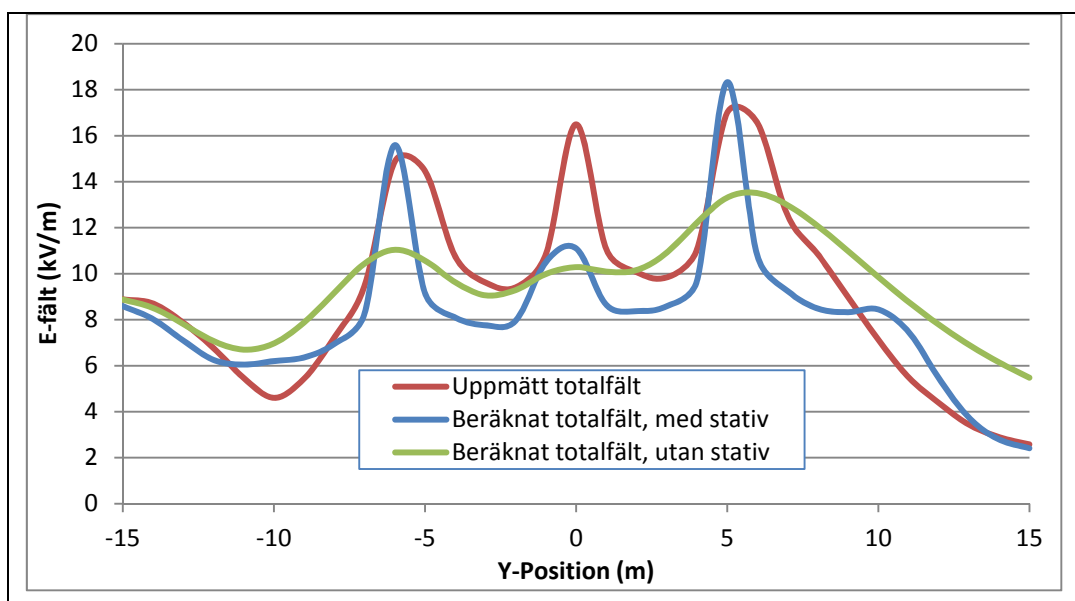
Figur 57. 420 kV av senare konstruktion.

Linje K: X=8,0, Y=6,25, Z=0,5 - - 3,0 m.

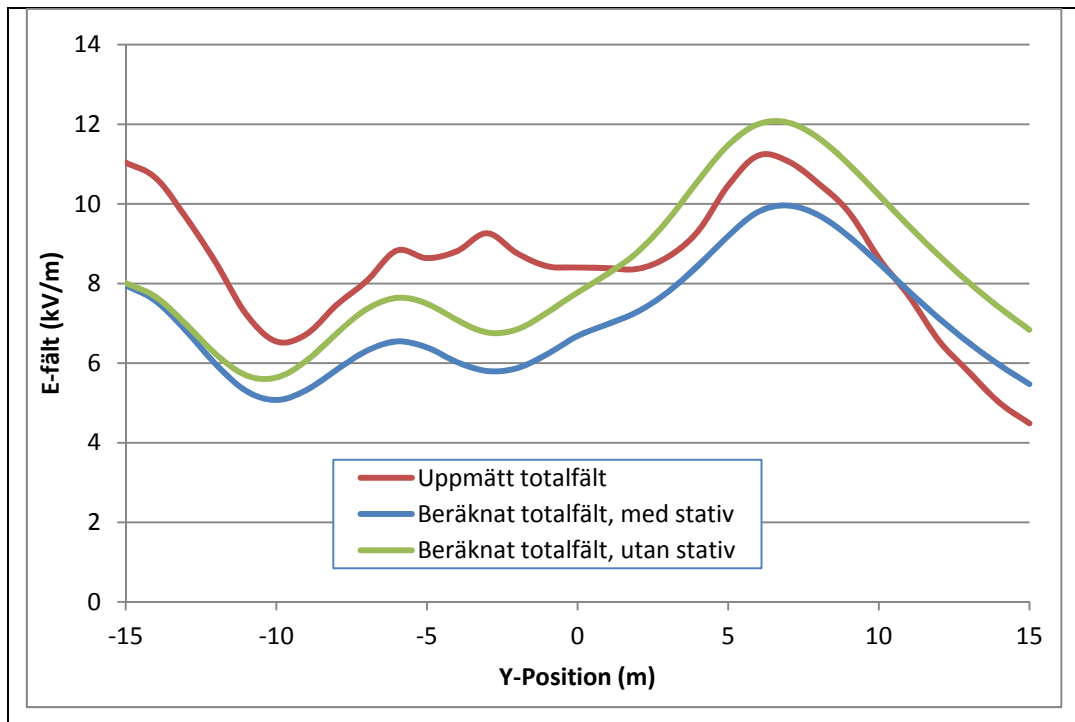
X och Y är horisontella komponenter, Z är vertikal.



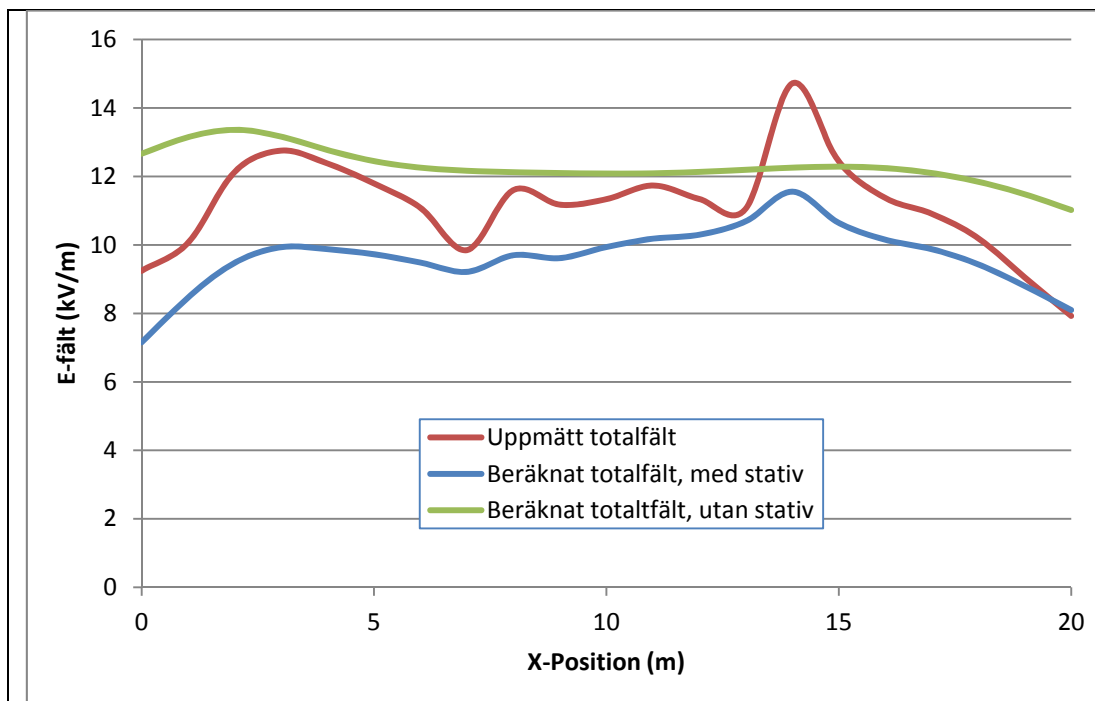
Figur 58. 420 kV av senare konstruktion.
Linje H: X=17,0, Z=2,0, Y=-32 -- 15,0 m.
X och Y är horisontella komponenter, Z är vertikal.



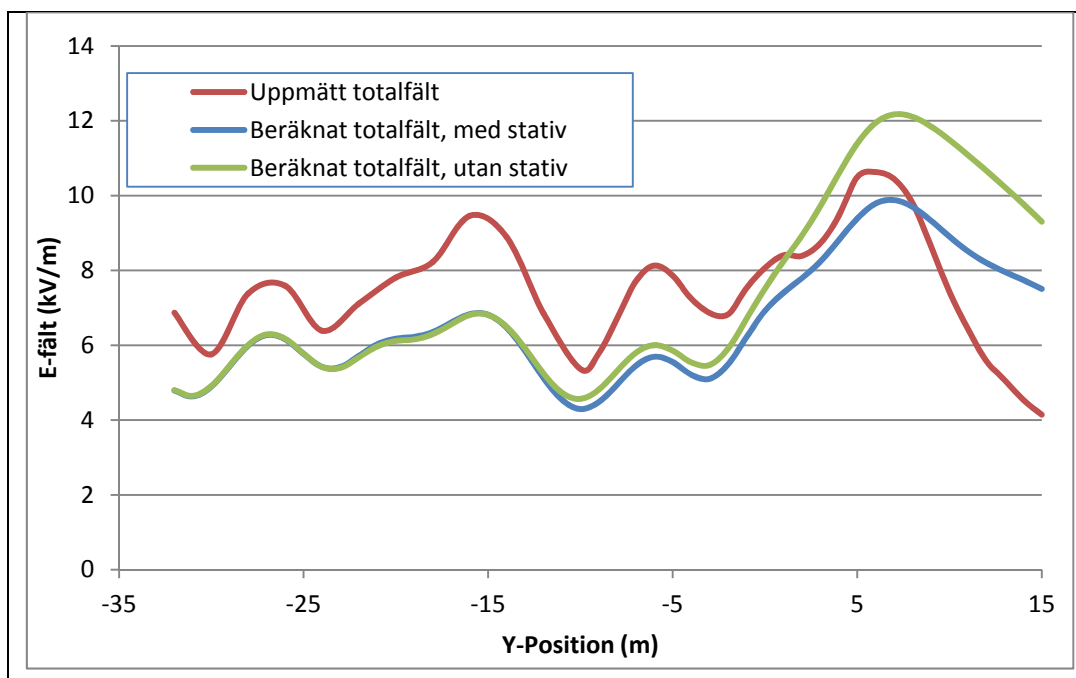
Figur 59. 420 kV av senare konstruktion. Jämför Figur 51.
Linje A: X=2,5, Z=2,0, Y=-15--15 m. Totalfält. Beräkning med och utan stativ.
X och Y är horisontella komponenter, Z är vertikal.



Figur 60. 420 kV av senare konstruktion. Jämför Figur 52.
Linje C: X=10, Z=2,0, Y=-15--15 m. Totalfält. Beräkning med och utan stativ.
X och Y är horisontella komponenter, Z är vertikal.



Figur 61. 420 kV av senare konstruktion. Jämför Figur 54.
Linje C: Y=6,5, Z=2,0, X= 0 --20 m. Totalfält. Beräkning med och utan stativ.
X och Y är horisontella komponenter, Z är vertikal.



Figur 62. 420 kV av senare konstruktion. Jämför Figur 58.
Linje M: X=17, Z=2,0, Y=-32--15 m. Totalfält. Beräkning med och utan stativ.
Observera att stativen bara är modellerade i Fack 1, dvs från ca -10 till +15.
X och Y är horisontella komponenter, Z är vertikal.



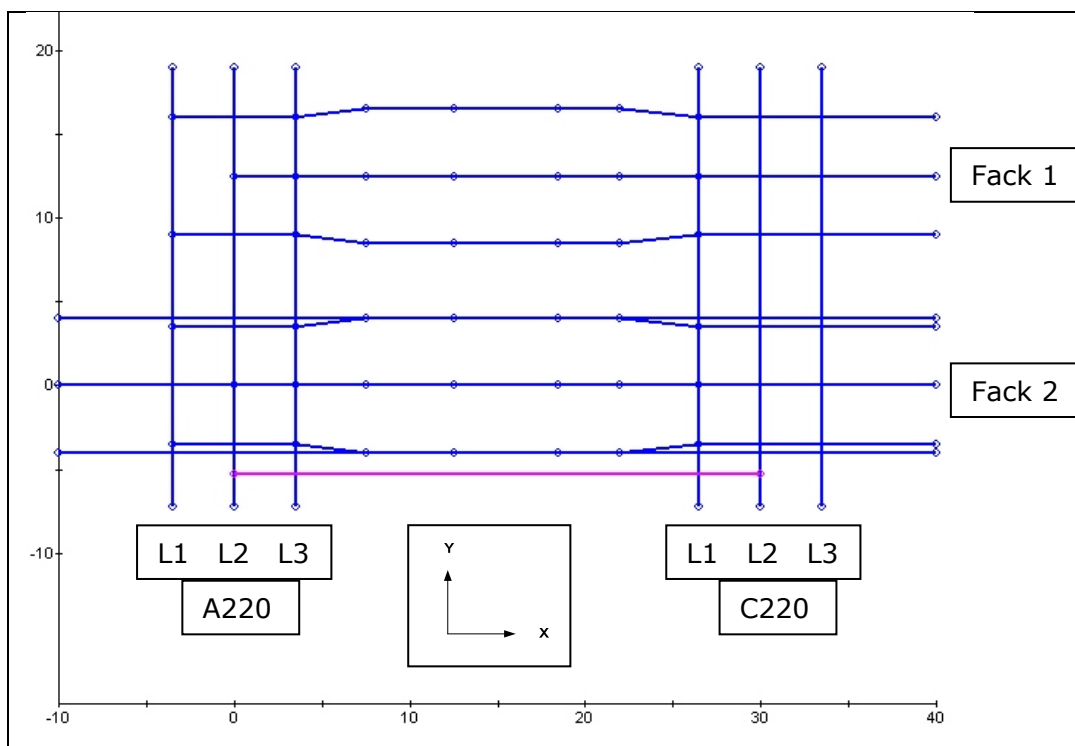
Figur 63. Mätprob och stativ uppställd framför ett apparatstativ.

8.3 Mätning i ett 220 kV ställverk

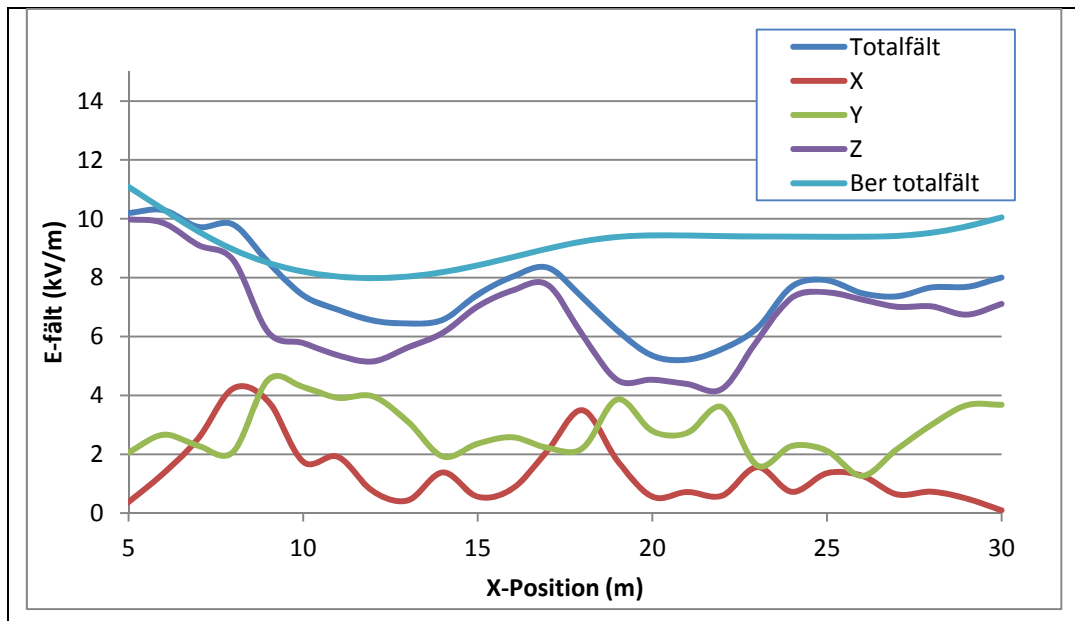
Den 14 september 2009 mättes den elektriska fältstyrkan i ett äldre 220 kV ställverk i stockholmstrakten. Fältet mättes på 2 meters höjd längs 2 linjer, vinkelrätt mot och parallellt med samlingsskenorna.

Figur 64 visar den modell som använts för att beräkna motsvarande linjer som de uppmätta. Modellen är helt identisk med den som visats i Figur 30. Figur 65 visar uppmätt och beräknat fält längs en linje vinkelrät mot samlingsskenan och strax utanför ytterfasen i Fack 2 (den röda linjen i Figur 64). Den beräknade kurvan är jämn och nivån styrs till stor del av höjden till fasledarna i Fack 2. Ledarna går lågt under A-skenan ($X = 0 - 3,5$ m), höjer sig något vid brytarna ($X = 9,5 - 13$ m) och sänker sig ner under C-skenan ($X = 26,5 - 33,5$ m) och fortsätter sedan på den lägre höjden. De stora stativerna för brytarna vid $X = 9,5 - 13$ m och för frånskiljaren vid $X = 19 - 22$ m begränsar det vertikala fältet, men åstadkommer också horisontella fältkomponenter av i storleksordningen 3 – 5 kV/m. Figur 65 visar att det beräknade fältet är i stort sett alltid högre än det uppmätta, vilket beror på den enkla modellen utan jordade stativ mm.

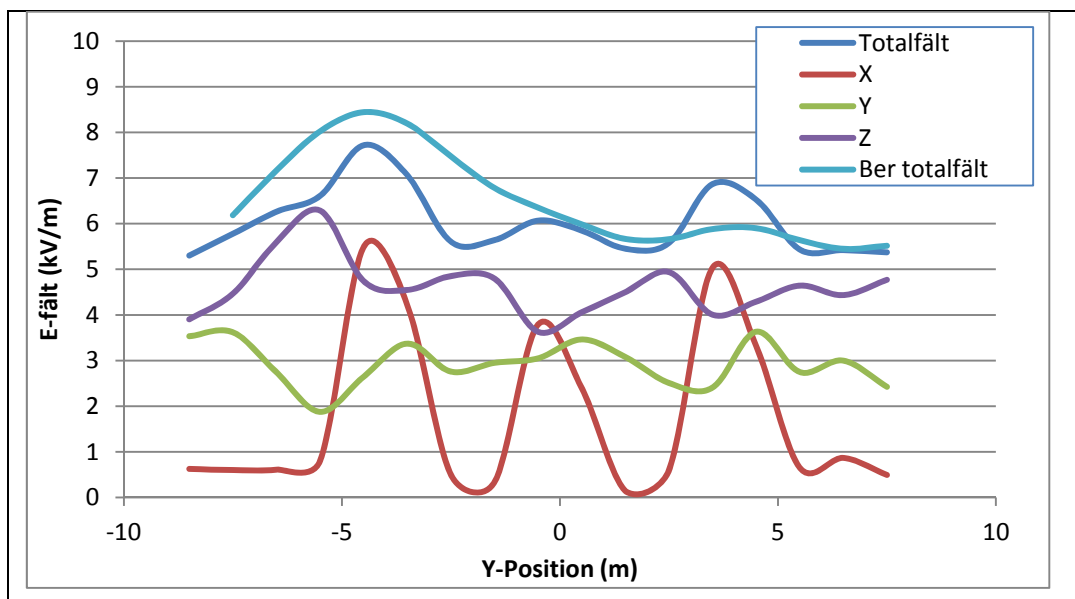
Situationen är snarlik för den linje parallellt med samlingsskenan som visas i Figur 66; den beräknade kurvan ligger i stort sett alltid över den uppmätta. De tre markanta topparna hos X-komponenten orsakas av stora skåp på de tre brytare som linjen passerar vid $Y = -4,0$; 0 och 4,0 m.



Figur 64. Modell 220 kV med en linje vid $Y = -5,3$ m. Jämför Figur 30.



Figur 65. Uppmätt och beräknat E-fält längs en linje vinkelrät samlingsskenan, vid $Y = -5,3$ m; $X = 5 - 30$ m och $Z = 2,0$ m. X och Y är horisontella komponenter, Z är vertikal.



Figur 66. 220 kV. Uppmätt och beräknat E-fält längs en linje parallellt samlingsskenan, vid $X = 13,8$ m; $Y = -8,5 - 7,5$ m och $Z = 2,0$ m. X och Y är horisontella komponenter, Z är vertikal.

Mätningarna i 220 kV ställverket visar att en beräkning med en enkel modell, utan jordade apparatstativ, ger en konservativ bild av fältet och att den maximala fältstyrkan når upp till drygt 10 kV/m. De redovisade beräkningarna vi-

sar på maximala fältstyrkor på upp till 14 kV/m, i ett område där ledarna i Fack 2 korsar A-skenan. Vid maxpunkten sitter de frånskiljare som kopplar facket till skenan och frånskiljarna vilar på stativ. Då beräkningarna har gjorts utan hänsyn till dessa stativ, får man förmoda att de beräknade fältstyrkorna är något för höga. Detta styrks av Figur 65, där det framgår att den beräknade kurvan stiger konstant från $X = 10$ till $X = 5$ m, medan den uppmätta kurvan visar på i stort sett konstanta värden från $X = 8$ till 5 m.



Figur 67. 220 kV. Bilden till vänster visar en mätlinje längs ett fack med stativ till frånskiljare i förgrunden och stativ till brytare längre bak. Bilden till höger visar mätproben uppställd invid ett skåp på ett brytarstativ.

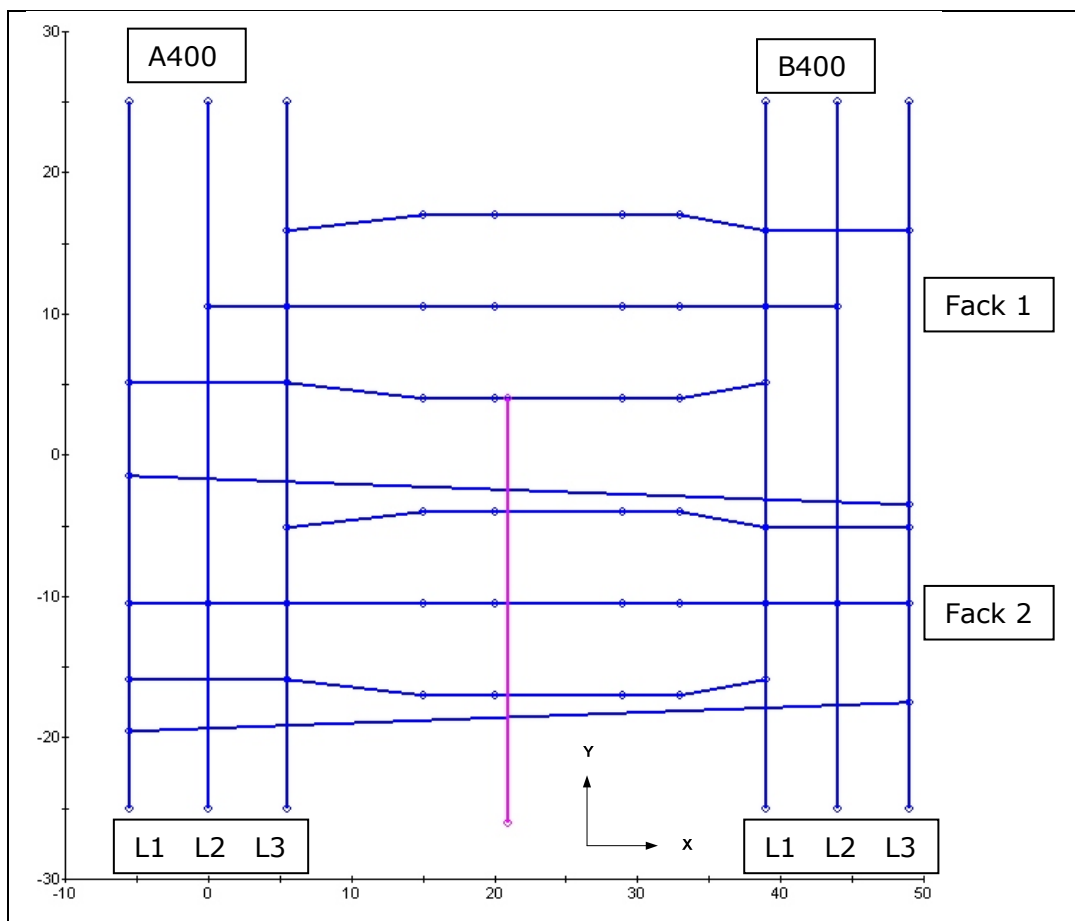
8.4 Mätning i ett 420 kV ställverk av äldre konstruktion

Den 14 och 15 september 2009 mättes den elektriska fältstyrkan i ett äldre 420 kV ställverk i stockholmstrakten. Fältet mättes i ett ytterfack på 2 meters höjd längs 2 linjer, vinkelrätt mot och parallellt med samlingsskenorna. Något år tidigare hade mer omfattande mätningar gjorts i samma ställverk och mätningarna 2009 kunde därför inriktas på några mer intressanta detaljer.

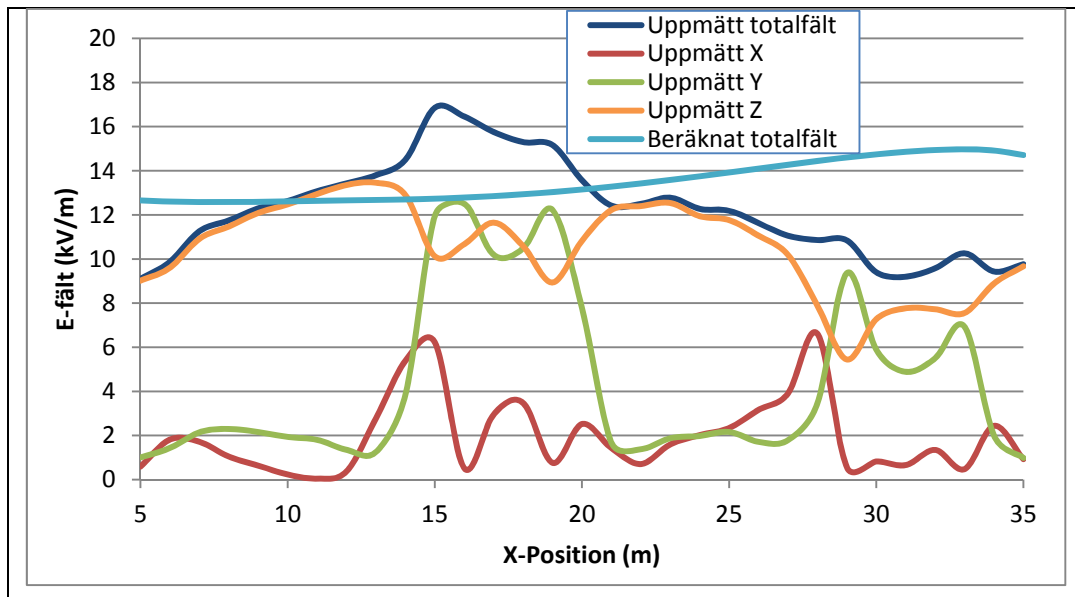
Figur 68 visar den modell som använts för att beräkna motsvarande linjer som de uppmätta och modellen är identisk med som tidigare visats i Figur 27. Figur 69 visar det uppmätta och det beräknade E-fältet längs en linje vinkelrät samlingsskenan, vid $Y = -18$ m. Det beräknade totalfältet varierar svagt mellan 12,5 och 15 kV/m, medan det uppmätta uppvisar betydligt större varia-

tioner. Det beräknade fältet är högre än det uppmätta under A-skenan, vilket kan bero på skärmande inverkan av ett frånskiljarstativ. Brytarna i facket, mellan $X = 15$ och 20 m, åstadkommer ett betydande horisontellt fält, samtidigt som det vertikala fältet skärmas av. Beräkningen, som är gjord utan hänsyn till stativ mm, tar ej hänsyn till detta och resultatet blir att det beräknade fältet blir ca 4 kV/m lägre än det uppmätta. Mellan $X = 25$ och 34 påverkas fältet av en frånskiljare på ett stort dubbelstativ. Detta syns tydligt på den betydande Y-komponenten och det något försvagade vertikalfältet. Det beräknade fältet blir åter högre än det uppmätta.

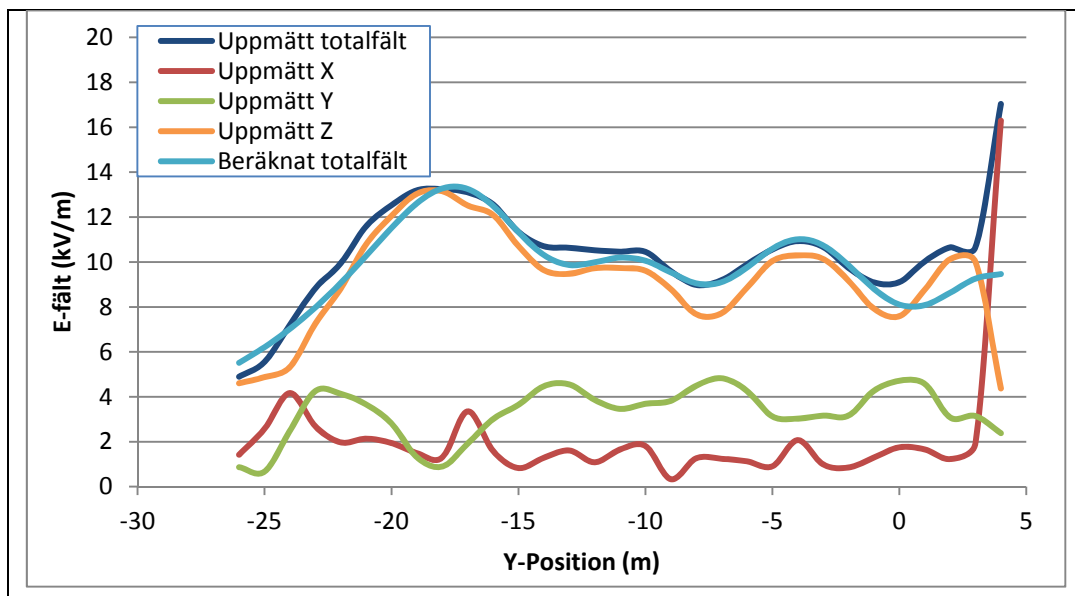
Fältstyrkan längs en linje parallellt med samlingsskenan, vid $X = 21$ m, visas i Figur 70. Överensstämmelsen mellan beräknat och uppmätt fält är i detta fallet god, med en märkbar avvikelse endast vid $Y = 0$ -- 4 m. För punkterna $X = 0$ -- 3 m är skillnaden måttliga $1 - 2$ kV/m och svår att förklara, medan den för $X = 4$ m är ca 8 kV/m eller närmare 100% . Orsaken till detta är närheten till ett större skåp på ett brytarstativ och det horisontella fält som detta åstadkommer.



Figur 68. 420 kV, gammal design, med linje vid $X = 21$ m. Jämför Figur 26.



Figur 69. 420 kV, gammal design. Uppmätt och beräknat E-fält längs en linje vinkelrät samlingsskenan, vid $Y = -18$ m; $X = 5$ -- 35 m och $Z = 2,0$ m. Linjen går mycket nära ett antal stora apparatstativ. X och Y är horisontella komponenter, Z är vertikal.

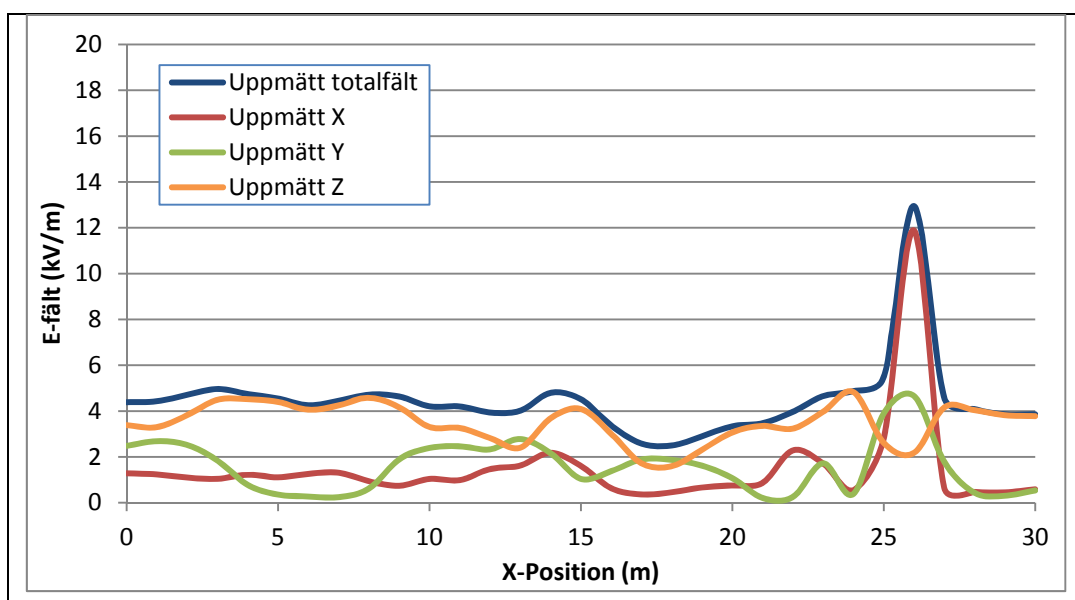


Figur 70. 420 kV, gammal design. Uppmätt och beräknat E-fält längs en linje parallellt samlingsskenan, vid $X = 21$ m; $Y = -26$ -- 4 m och $Z = 2,0$ m. Linjen går till stora delar tämligen fritt och strax utanför den asfalterade vägen genom ställverket. Väg vid $X = 22,5$ -- $26,0$ m. X och Y är horisontella komponenter, Z är vertikal.

Mätningar och beräkningar för detta äldre 420 kV ställverk visar att den förenklade modellen i allmänhet ger ett rimligt resultat. Stora apparatstativ kan dock påverka fältet kraftigt och både uppåt och nedåt. Vid denna spänningsnivå är de äldre stativen för brytare och frångiljare mycket stora och större än motsvarande mer moderna. Figur 70 visar att beräknings-modellen ger ett acceptabelt resultat för öppna ytor.

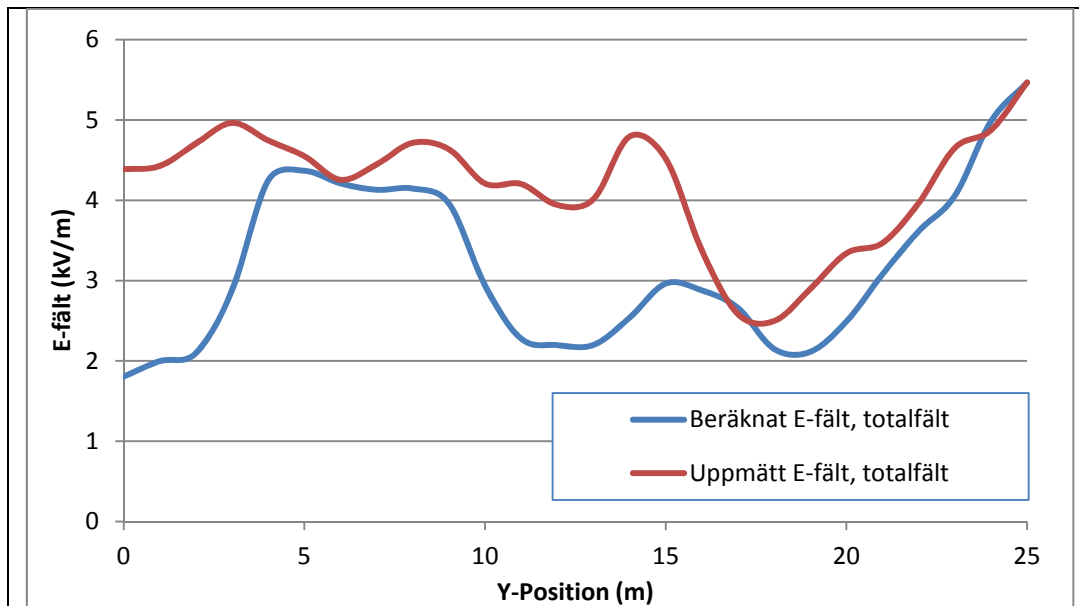
8.5 Mätning i ett 130 kV ställverk

Den 15 september 2009 mättes den elektriska fältstyrkan i ett modernt 130 kV ställverk i stockholmstrakten. Fältet mättes på 2 meters höjd och längs två längre linjer, parallellt med och vinkelrätt mot samlingsskenan.



Figur 71. 130 kV. Linje E. Uppmätt fält. Vid X = 26 m påverkas fältet av ett brytarstativ, som ger upphov till ett betydande horisontellt fält och samtidigt reducerar den vertikala fältkomponenten. X och Y är horisontella komponenter, Z är vertikal.

Med en numerisk beräkning av E-fältet utefter samma mätlinje som i Figur 71 och med modell E enligt Figur 7 fås den blå kurvan i Figur 72. Den röda kurvan visar samma uppmätta värden för det totala E-fältet som i Figur 71. De höga värdena vid X = 5 - 10 m beror på att samma fasläge på spänningen i två fack, samlingsskena och en in/utgående ledning samverkar. Det betyder att om man befinner sig mitt emellan de båda facken är det samma fasläge (L3) på närmaste skena i de båda facken, d v s faserna är speglade. Dessutom är också L3 närmaste fas på samlingsskenorna och på ledningen. Befinner man sig däremot utanför den speglade kombinationen kommer E-fältet att vara mindre i detta fall än när faserna har samma fasordning, d v s L1, L2, L3 och L1, L2, L3. Spegling av denna typ är inte vanligt förekommande och framförallt inte i ställverk av äldre datum.



Figur 72. 130 kV. Linje E. Jämförelse mellan numeriskt beräknat och uppmätt E-fält. I området mellan 0 och 5 m är modellens detaljeringsgrad mindre god.

De betydande avvikelserna mellan $X = 10$ och 15 m beror troligen på att balkar i ett närliggande fränskiljarstativ påverkar mätresultat och beräkningar i olika grad. Modellen är en förenkling av verkligheten och även små fel på detaljer nära beräkningslinjen kan påverka slutresultatet i betydande grad. I detta fall passerar beräkningslinjen endast $0,55$ m från stativet och detaljutformningen i modellen blir därför mycket kritisk. Figur 71 visar också att de horisontella komponenterna är betydande i detta område, vid $X = 13$ m är en komponent t o m större än vertikalkomponenten.

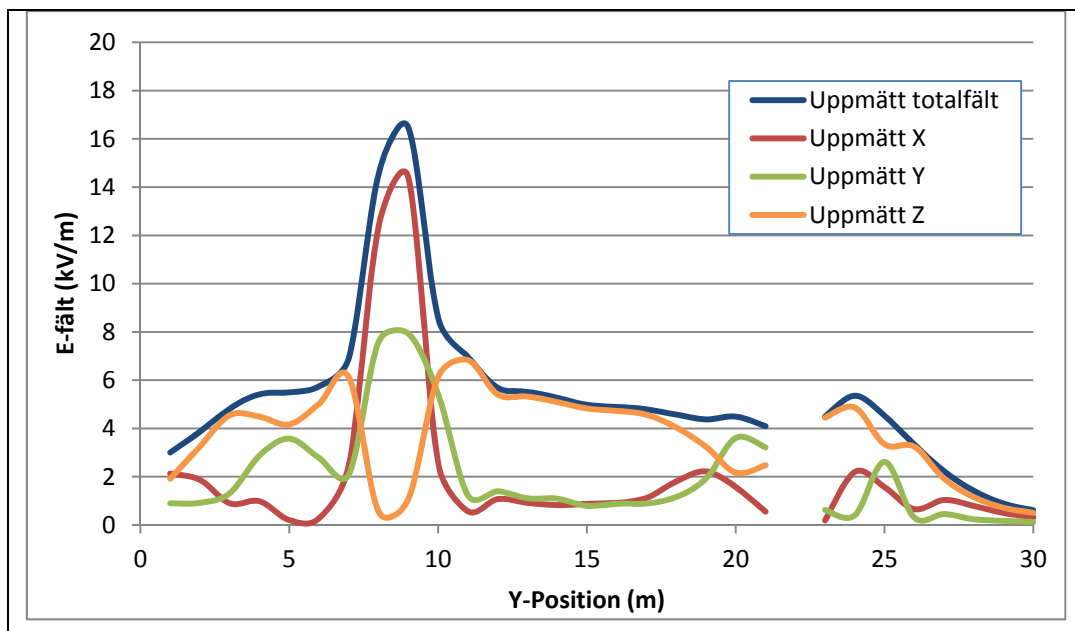
Figur 73 visar det analytiskt beräknade och det uppmätta fältet längs linje F, vinkelrätt mot samlingsskenan. Vid $Y = 8$ m syns en tydlig topp orsakad av en hög horisontalkomponent p g a ett manöverdon till en brytare och vid $Y = 22$ saknas ett mätvärde.

Med en numerisk beräkning av fältet längs linje F och med en modell enligt Figur 7 fås den röda kurvan i Figur 74. Den blå kurvan visar uppmätt totalfält och är identisk med den blå kurvan i Figur 73.

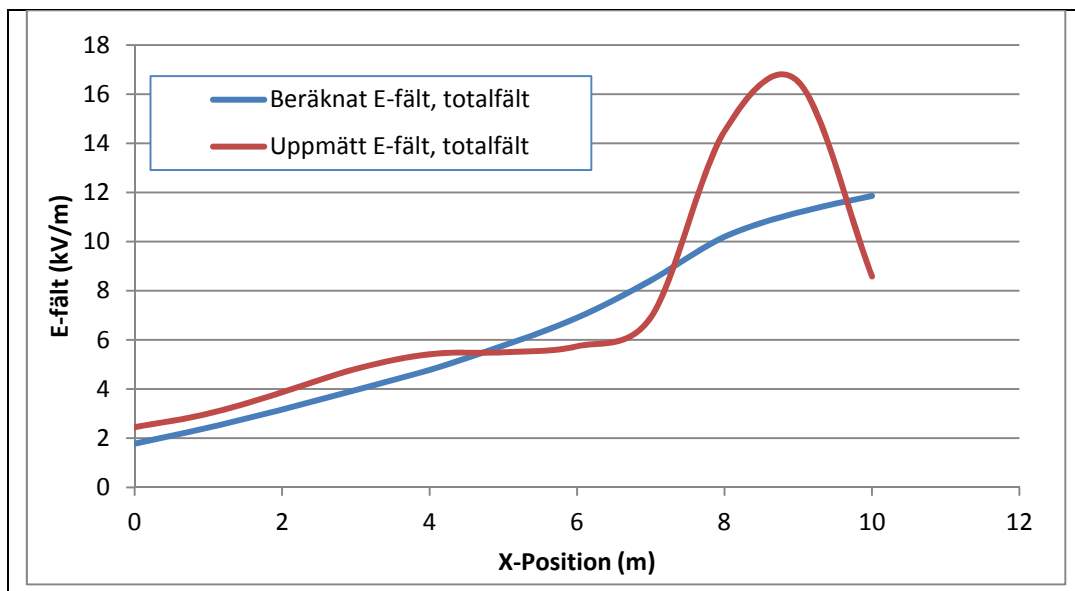
Överensstämmelsen mellan uppmätta och beräknade värden är god fram till den markanta toppen vid $X = 7$ – 10 m. Därefter är avvikelserna betydande och det visar sig åter att det är svårt att skapa en i datorn hanterlig modell som korrekt förmår återge de horisontella fältkomponenterna. Den detaljerade modellen, med stativ och andra jordade konstruktioner, slutar vid $X = 5,7$ m och hela modellen tar slut vid $X = 10,3$ m.

Vid en analys av det uppmätta fältet längs linje F, med hjälp av dess komponenter, framgår det att de horisontella X och Y-komponenterna är större än den vertikala vid $X=8$ och 9 m. Orsaken till detta är att det närliggande brytarmanöverdonet påverkar fältet till riktning och storlek. Detta utgör en intressant illustration av hur jordade stativ och apparatskåp ger lokalt förhöjt E-

fält i sin nära omgivning. En närmare förklaring till betydelsen av detta ges i avsnitt 9. Exponering för horisontella fältkomponenter.



Figur 73. 130 kV. Linje F. Uppmätt fält. X och Y är horisontella komponenter, Z är vertikal.



Figur 74. 130 kV. Linje F. Jämförelse mellan numeriskt beräknat och uppmätt E-fält. De beräknade värdena i slutet på kurvan, mellan 7 och 10 m, är osäkra då modellen inte har så hög detaljeringsgrad i detta område.

9 Exponering för horisontella fältkomponenter

I föregående avsnitt har det visats att det elektriska fältet i olika ställverksmiljöer kan uppvisa betydande horisontella komponenter. I synnerhet nära stativ, skåp och andra jordade föremål kan de horisontella komponenterna bli stora och inte sällan väl i nivå med eller större än den vertikala komponenten. Detta blir en särskilt intressant fråga i de fall när det totala fältet överstiger insatsvärdet på 10 kV/m - hur skall då de horisontella fältkomponenterna bedömas.

I normalfallet bör bedömning baseras på aktuell utgåva av ICNIRP Guidelines [4] och dess underliggande dokument, som det presenterats i avsnitt 3 i denna rapport. Det är emellertid så att all redovisning av ett yttre elektriskt fält inverkan på människokroppen förutsätter att E-fältet är vertikalt, vilket är helt rimligt mot bakgrund av att fältet huvudsakligen är vertikalt under kraftledningarna och ledare på hög höjd ovan mark. De resultat som sammanfattas i tabellerna 4, 6, 7, 8 och 10 avser också alla ett vertikalt elektriskt fält.

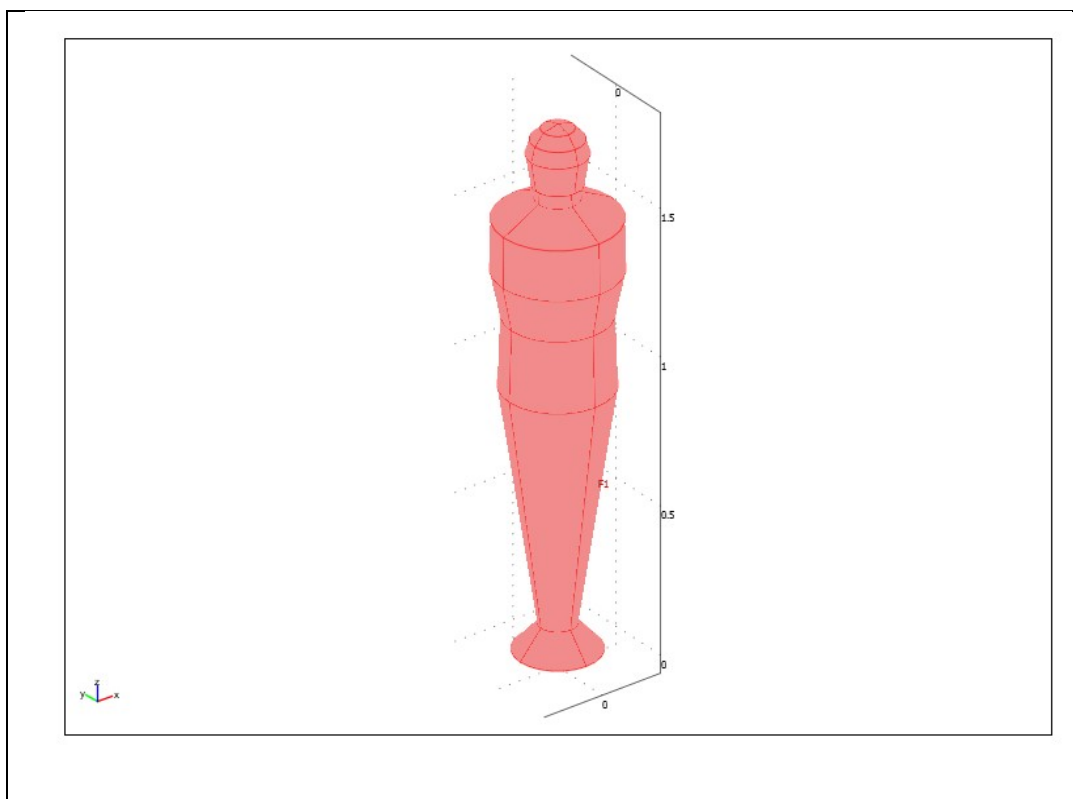
Ett skäl för att basera riktvärden för exponering på ett vertikalt E-fält är att det ger upphov till högre strömtäthet och högre in situ (i kroppen) fältstyrka än ett horisontellt fält av samma storlek. Detta förhållande har visats i bl a IEC-standarden 62226-3-1 "Exposure to electric or magnetic fields in the low and intermediate range - Methods for calculating the current density and internal electric field induced in the human body - Part 3.1: Exposure to electric fields - Analytical and 2D numerical models" [34]. I standarden beskrivs en analytisk metod för att beräkna strömtätheten i sfäroider eller rotationsellipsoider som utsätts för ett elektriskt fält riktat parallellt med eller vinkelrätt mot rotationsaxeln. Man visar för en sådan kropp att strömtätheten vid exponering för ett fält parallellt med rotationsaxeln (=längdaxeln) blir väsentligt större än vid exponering för ett fält vinkelrätt mot densamma. För en kropp med "mänskliga" proportioner blir relationen i storleksordning 0,134 mA/m² till 0,006 mA/m², vid exponering för ett 50 Hz fält av storleken 1 kV/m

En annan möjlighet att studera detta är med hjälp av den "Human body axis-symmetrical model" som beskrivs i samma IEC-standard [34]. Även denna modell är rotationssymmetrisk men uppvisar mer "mänskliga" drag än rotationsellipsoiden. Den "manliga" modellen är 1,76 m lång och baseras på en studie av 1774 representativa män i US ARMY år 1988. Det finns även en motsvarande kvinnlig modell, som är något kortare och har bl a en mer tydlig midja. Beräkningar har gjorts och redovisas i standarden för en homogen modell eller kropp med den inre konduktiviteten 0,2 S/m, motsvarande människokroppens medelkonduktivitet. Kroppen har placerats vertikalt i ett stort platta-platta gap, med "fötterna" i kontakt med den nedre jordade plattan. Den övre plattan är spänningssatt. Med detta arrangemang fås ett vertikalt och homogent fält, som endast påverkas av den ledande kroppen.

Strömtätheten i kroppen kan beräknas med en numerisk metod och i standarden presenteras denna för en vertikal linje från fotsulorna och upp till

hjässan. Strömtätheten uppvisar ett tydligt maxima vid anklarna, där kroppstvärsnittet är litet och ett mindre markant maxima vid halsen, där tvärsnittsarean också är mindre. För ett yttre och vertikalt 50 Hz E-fält av 1 kV/m redovisas en strömtäthet i halstvärsnittet av 0,233 mA/m². Det är givetvis så att i verkligheten passerar endast en del av denna ström via den kritiska ryggmärgskanalen, medan resten leds förbi via de stora blodkärlen och halsmuskulaturen. Siffran kan dock ändå användas som ett konservativt mått på strömtätheten genom kritisk vävnad i kroppen.

Detta första enkla fall visas i standarden och kan också återskapas med de uppgifter som ges däri. Figur 75 visar den 1,76 m långa axialsymmetriska modellen som byggts upp av rätta linjer mellan ett antal koordinater givna i IEC 62226-3-1 [34]. Modellen har skapats i COMSOL Multiphysics och de följande beräkningarna har genomförts med denna programvara.

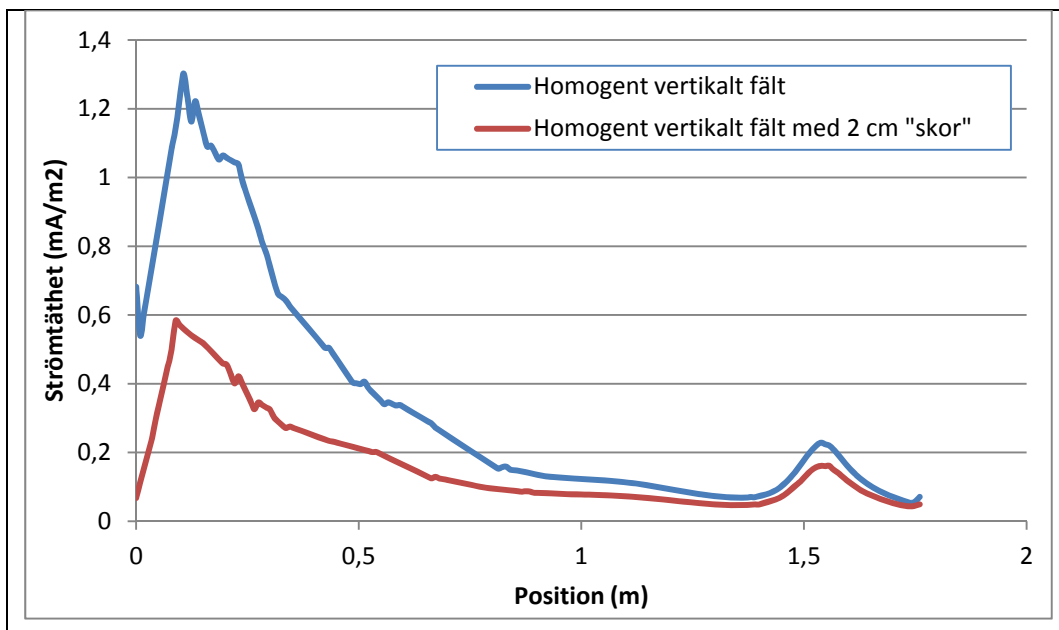


Figur 75. Axialsymmetrisk modell enligt IEC 62226-3-1, 2007 [34].

Det elektriska fältet skapas av två cirkulära plattor med radien 10 m och placerade 10 m från varandra. Med en spänning av 10 kV mellan plattorna fås ett ostört fält av i det närmaste 1 kV/m längs gapets centrumlinje. Den människoliknande modellen har sedan placerats i centrum av den jordade plattan och med "fötterna" i direktkontakt med jord.

Strömtätheten längs modellens rotationsaxel visas i Figur 76. Kurvan är snarlik men inte helt identisk med den som visas i IEC-standard. Den senare är

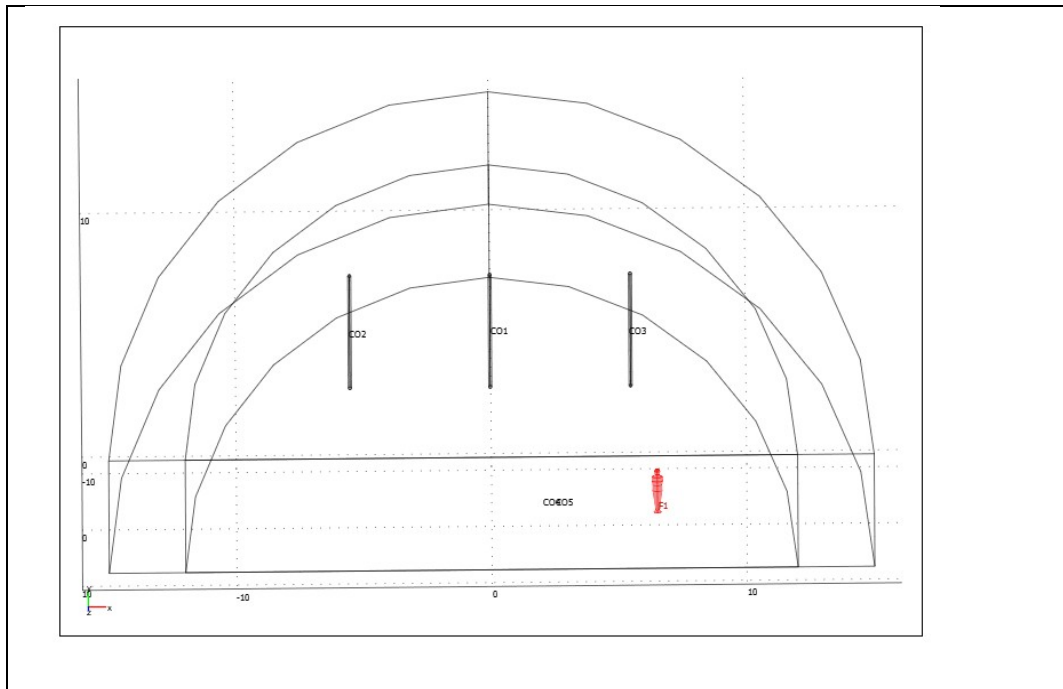
jämnare, vilket kan bero på högre upplösning i den numeriska beräkningen eller en medelvärdesbildning av resultatet. Det intressanta värdet för halstvärsnittet eller "Base of neck" är $0,229 \text{ mA/m}^2$ för den här beräknade modellen och $0,233 \text{ mA/m}^2$ för IEC-modellen. Skillnaden är högst marginell och visar att det är möjligt att använda modellen för andra beräkningar.



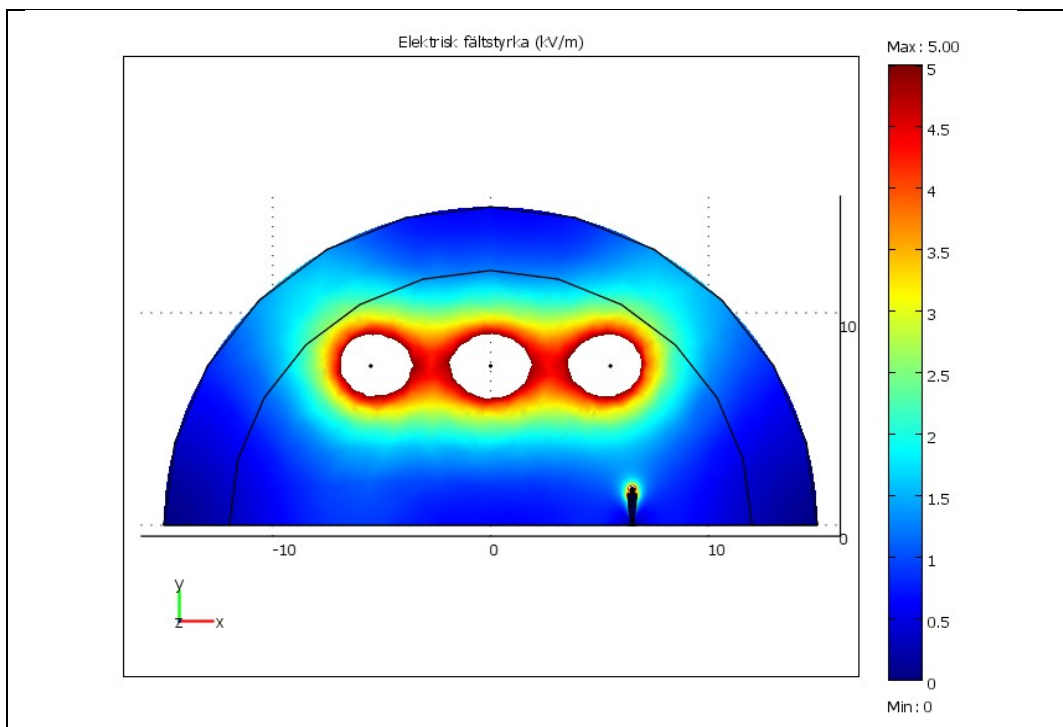
Figur 76. Strömtätheten längs modellens rotationsaxel. Jordad modell i ett homogent fält på 1 kV/m och med 2 cm luftgap mellan fötterna och jord.

I grundfallet har modellen kontakt med det jordade bottenplanet, vilket kan förväntas ge högre strömtäthet än om modellen är isolerad från jord. Figur 76 visar även strömtätheten för det fall då modellen har fotsulorna 2 cm ovan ett jordat plan. För halstvärsnittet fås då en maximal strömtäthet av $0,161 \text{ mA/m}^2$. Med 1 cm luftgap fås $0,181 \text{ mA/m}^2$ i halstvärsnittet och med 5 cm luftgap fås $0,140 \text{ mA/m}^2$.

I verkligheten är fälten mer eller mindre inhomogena och vanligen orsakade av 3-fas arrangemang. Figur 77 visar en beräkningsmodell som påminner om ett ställverk. Tre rörformade ledare 7,5 m ovan mark och med ett inbördes avstånd av 5,5 m används för att skapa ett mer inhomogent fält. Människo-modellen har placerats 1 m utanför ytterfas och spänningen på skenstråket har sedan anpassats till 57,3 kV för att ge en fältstyrka på 1 kV/m i en punkt 1,5 m ovan mark och 1 m utanför ytterfasen. Med denna geometri fås högst fältstyrka i en punkt 0,5 – 1 m utanför ytterfasen. Det beräknade fältet visas i Figur 78.

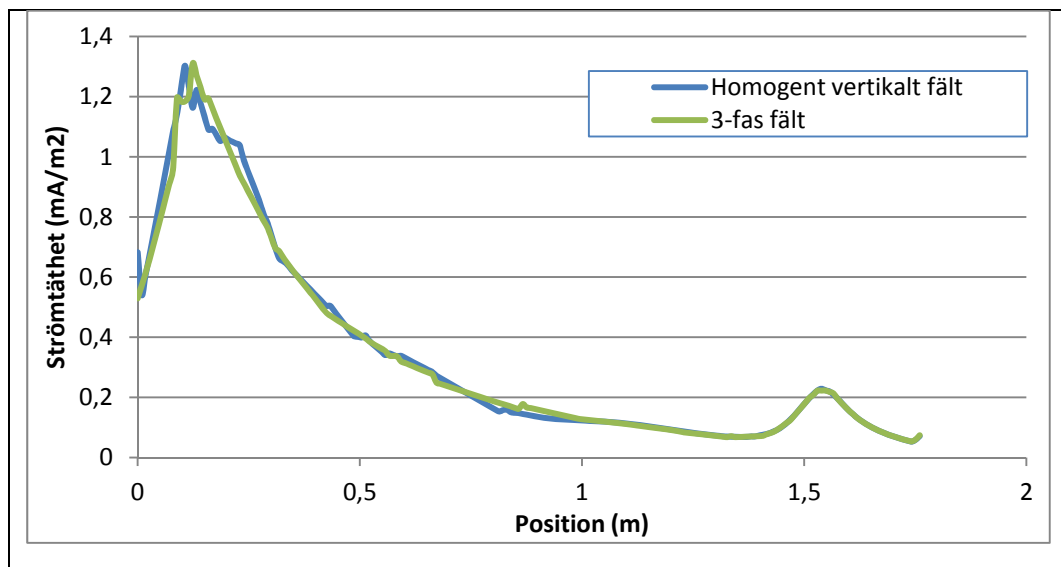


Figur 77. Beräkningsmodell med 3-fas fält.



Figur 78. Det elektriska fältet i fallet med 3 faser och en jordad människa. Spänningen anpassad för att ge ett E-fält av 1 kV/m i en punkt 1 m utanför ytterfas och 1,5 m ovan mark.

Figur 79 visar den beräknade strömtätheten för detta fall. Det visar sig att strömtätheten blir ungefär densamma som för ett homogent fält av samma styrka. För det kritiska halstvärnsnittet fås $0,23 \text{ mA/m}^2$ med homogent fält och $0,22 \text{ mA/m}^2$ med 3-fas fält. Orsaken till detta är att strömtätheten beror av det lokala elektriska fältet, som mera påverkas av den ledande människokroppen än av ledarnas form och placering. Fältets variation orsakad av 3-fas arrangemanget är därtill högst måttlig över den smala människomodellen.



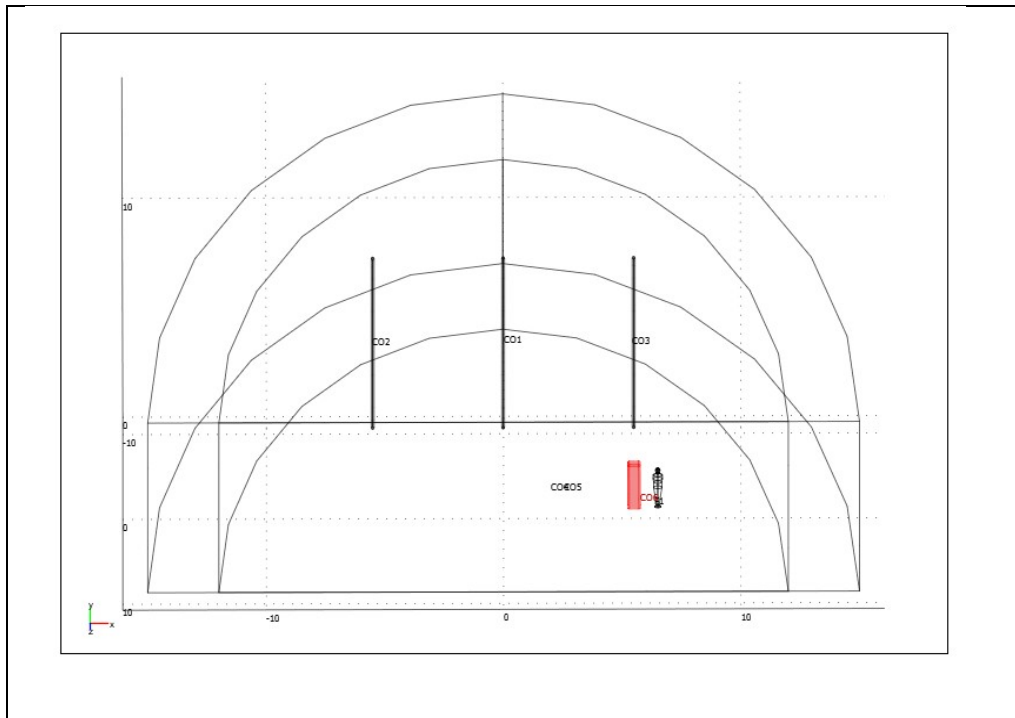
Figur 79. Strömtätheten längs den axialsymmetriska modellens rotationsaxel. Modellen placerad dels i ett 3-fas fält och dels i ett homogent vertikalt fält. I båda fallen är fötterna i direktkontakt med det jordade bottenplanet. Spänningen anpassad för att ge ett E-fält av 1 kV/m i en punkt 1 m utanför ytterfas och $1,5 \text{ m}$ ovan mark.

För att studera inverkan av horisontella fältkomponenter kan beräkningsmodellen kompletteras med en jordad pelare. Figur 80 visar detta med en pelare placerad rakt under den ena ytterfasen. Pelaren är uppbyggd som en sluten kropp med tvärsnittet $0,5 \times 0,5 \text{ m}$ och höjden 2 m . Pelarens höjd har stor betydelse för resultatet vilket kan visas med en jämförande beräkning med en $3,5 \text{ m}$ hög pelare. Figur 81 visar den motsvarande fältbilden i fallet med en $3,5 \text{ m}$ hög pelare. Fältets storlek och riktning påverkas av pelaren som visas i Tabell 18.

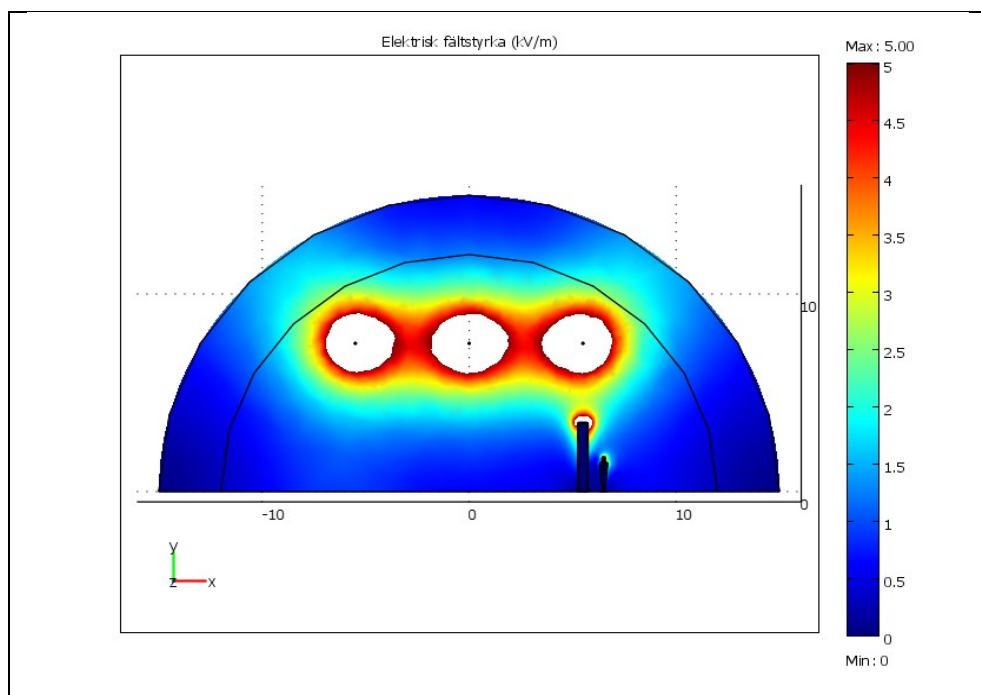
Beräkningsfall	Elektrisk fältstyrka (kV/m) i en punkt 1,5 m ovan jordplanet och 1 m utanför ytterfasen			
	Horisontell komponent i riktning parallellt med ledarna	Horisontell komponent i riktning vinkelrätt mot ledarna	Vertikal komponent	Totalfält
Homogent vertikalt fält	0,00	0,00	1,00	1,00
3-fas fält	0,00	0,11	0,99	1,00
2 m pelare	0,00	0,54	0,85	1,00
3,5 m pelare	0,00	0,51	0,56	0,75

Tabell 18. Beräknad fältstyrka invid pelare. Spänningen anpassad för att ge $E = 1,0$ kV/m i aktuell punkt, vid homogent vertikalt fält.

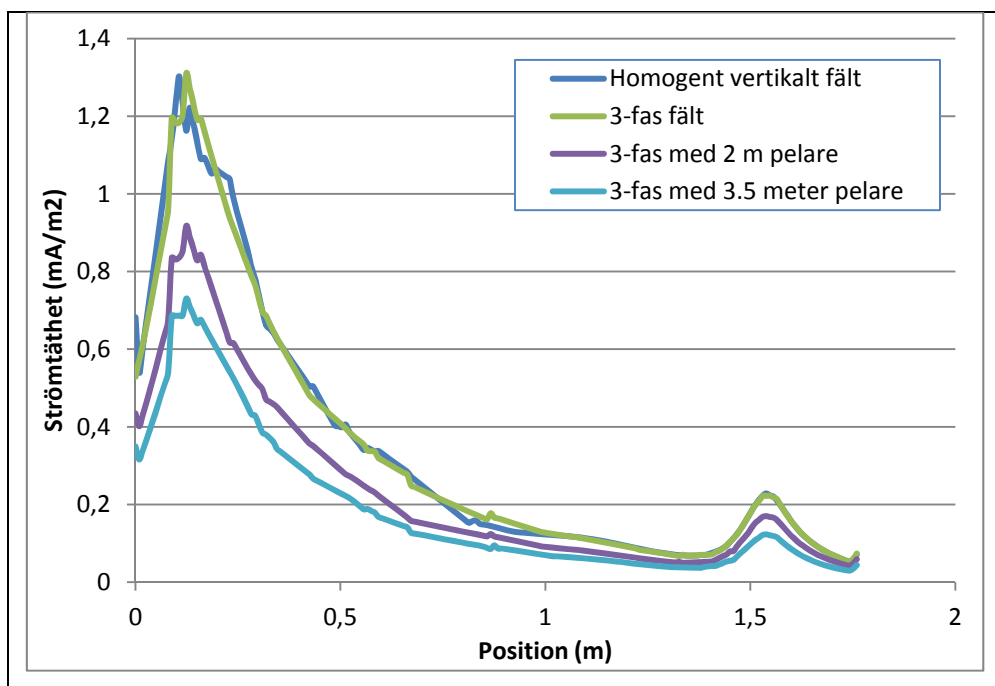
Figur 82 och Figur 83 visar strömtätheten i människomodellen under inverkan av en jordad pelare med höjden 2,0 respektive 3,5 m. Kurvorna för homogent och 3-fas fält visas som referens. Med pelare fås en betydande reduktion; 0,17 mA/m² med den lägre pelaren och 0,12 mA/m² med den högre.



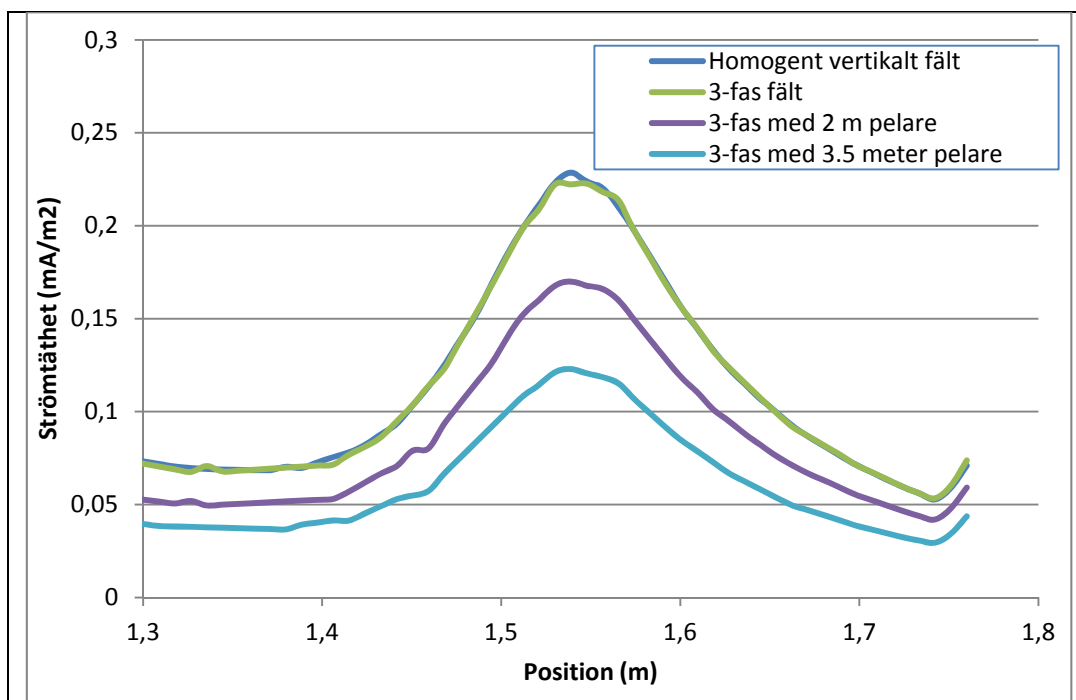
Figur 80. Beräkningsmodell med 3-fasigt fält och en jordad pelare.



Figur 81. Elektrisk fältstyrka beräknad med en 3,5 m hög pelare. Spänningen anpassad för att ge ett E-fält av 1 kV/m i en punkt 1 m utanför ytterfas och 1,5 m ovan mark.



Figur 82. Strömtätheten längs modellens rotationsaxel. Modell i ett 3-fasigt fält med $E = 1 \text{ kV/m}$ i en punkt 1 m utanför ytterfas och 1,5 m ovan mark och med en 2,0 resp. 3,5 m hög pelare.



Figur 83. Strömtätheten längs modellens rotationsaxel. Detalj av Figur 76 visande sektionen genom halstvärnsnittet. $E = 1 \text{ kV/m}$.

I den aktuella IEC-standarden [34], där beräkningarna med den axial-symmetriska modellen i det homogena fältet presenteras, använder man den maximala strömtätheten genom halstvärnsnittet för att beräkna den högsta fältstyrka kroppen kan exponeras för utan att strömtätheten överstiger det tidigare gränsvärdet på 10 mA/m^2 . I standarden ges ett analytiskt beräknat värde på $0,244 \text{ mA/m}^2$ och det numeriskt beräknade värdet på $0,233 \text{ mA/m}^2$, som nämnts tidigare i detta avsnitt. Dessa värden gäller för ett ostört vertikalt fält av 1 kV/m . För att uppnå 10 mA/m^2 krävs $10/0,244 \approx 41 \text{ kV/m}$ respektive $10/0,233 \approx 43 \text{ kV/m}$. Rimligheten av dessa värden styrks av andra numeriska beräkningar utförda av bl a Dimbylow [29]. Med modellen NORMAN, som är av ungefär samma storlek, fås vid ett vertikalt 50 Hz E-fält av 1 kV/m och med fötterna i kontakt med jord, en strömtäthet i ryggmärgskanalen på $0,178 \text{ mA/m}^2$. Dimbylows beräkningar visar att den högsta strömtätheten, vid samma förutsättningar, fås i näthinnan hos den kvinnliga modellen NAOMI. Med ett för näthinnan beräknat värde på $0,217 \text{ mA/m}^2$, krävs en fältstyrka av ca 46 kV/m för att uppnå 10 mA/m^2 .

Detta resonemang visar att exponering för ett homogent E-fält av storleksordningen $41\text{--}46 \text{ kV/m}$ kan medföra en medelströmtäthet i hela halstvärnsnittet på 10 mA/m^2 , om människan har direktkontakt med fötterna mot jord. Skor med isolerande sulor minskar strömtätheten påtagligt.

Närheten till en jordad pelare eller ett stativ medför ett högre ostört elektriskt totalfält. De horisontella fältkomponenterna ökar medan det vertikala fältet minskar. Resultatet blir lägre strömtäthet trots att totalfältet kan bli högre än för den ostörda miljön.

Detta resonemang har hittills bara omfattat begreppet strömtäthet, men då denna storhet kan komma att ersättas av fältstyrkan in situ, som ett mått på människokroppens exponering för ett yttre fält, bör sambandet mellan dessa storheter klarläggas:

Enligt Ohms lag gäller att: $\mathbf{J} = \sigma \cdot \mathbf{E}$

där $\mathbf{J}$ = Strömtätheten in situ, σ = Kroppens konduktivitet och $\mathbf{E}$ = Fältstyrkan in situ

Med en konstant konduktivitet, i exemplen ovan är $\sigma = 0,2 \text{ S/m}$, fås en konstant relation mellan fältstyrka och strömtäthet. Det ovan sagda om strömtätheten och dess beroende av fältets riktning gäller givetvis därmed också fältstyrkan in situ.

För att närmare belysa detta visas i Tabell 19 samma exempel med och utan pelare som tidigare, men med $U = 420 \text{ kV}$ och därmed en fältstyrka motsvarande den som vanligen förekommer i ett normalt 420 kV ställverk. Det yttre elektriska fältet har beräknats utan "mänsklig" modell närvarande (ostört fält) och för en punkt 1,75 m ovan mark, d v s i nivå med skallbenets övre del. Strömtätheten och fältstyrkan in situ har beräknats med modell och för $H = 1,54 \text{ m}$, d v s i nivå med det kritiska halstvärnsnittet.

Tabellen visar att strömtäthet och fältstyrka in situ till största delen beror av den vertikala fältkomponentens storlek och inte av det totala fältets storlek. Relationen mellan det vertikala fältets storlek och strömtätheten varierar mellan 0,17 och 0,23 mA/m² per kV/m. Detta kan jämföras det av Dimbylow beräknade värdet på 0,178 mA/m² för ett homogent vertikalt fält. De horisontella fältkomponenterna har marginell inverkan på resultatet och betydelsen av dessa kan tonas ner. En bedömning av en exponeringssituation bör därför framförallt kunna baseras på det vertikala fältets storlek.

I komplex miljö bör fältets komponenter mätas för att det ger betydande information om källorna för fältet och underrättar förståelsen. Vid en beräkning däremot, bör det vara möjligt att bortse från jordade stativ mm som minskar det vertikala fältets storlek.

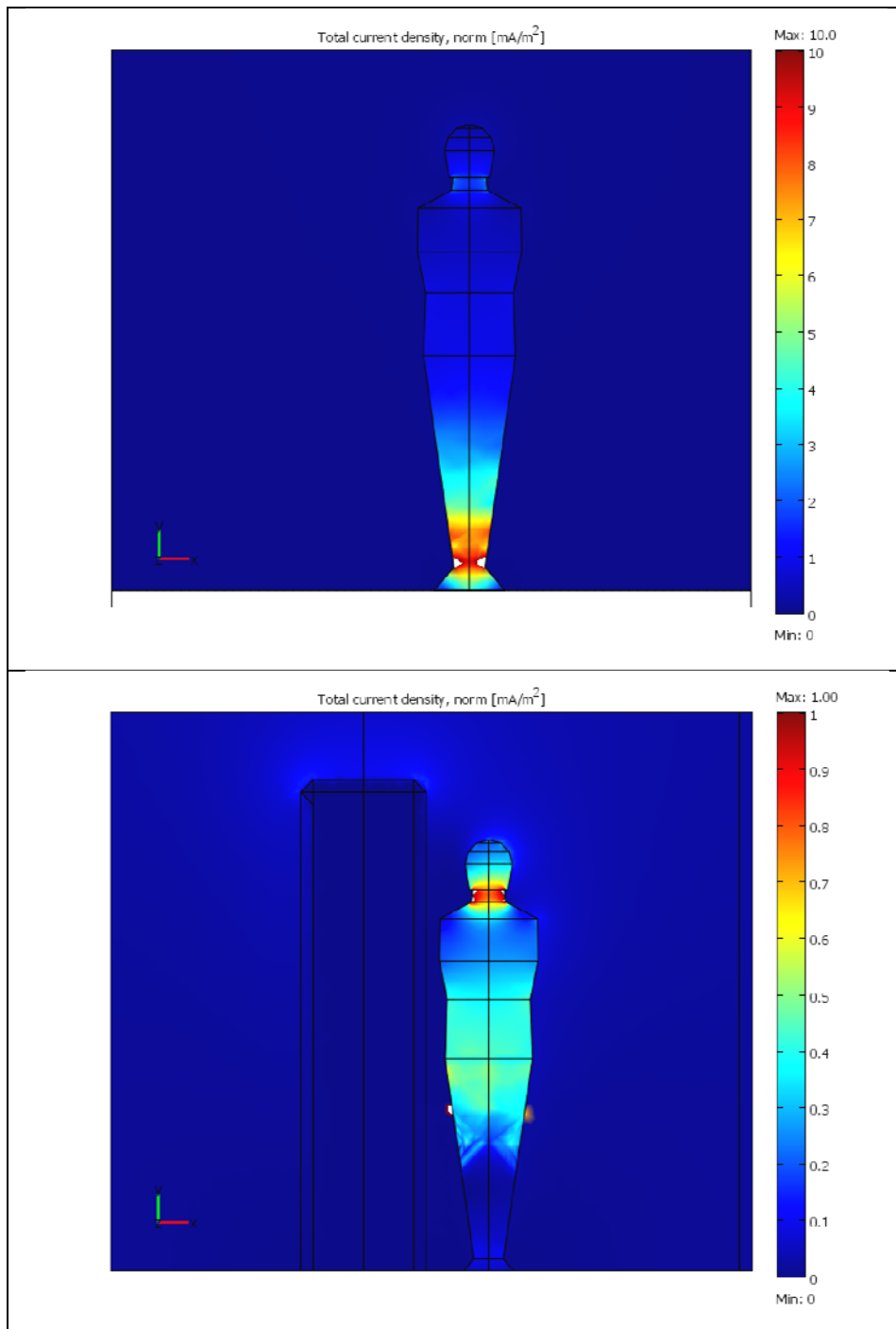
I de beräknade exemplen har "människan" stått på marken. Om han eller hon istället befinner sig på några meters höjd ovan mark, ökar det elektriska fältet. En placering rakt under fasledare medför att det vertikala fältet ökar, men fältstyrkan kan nå 40-45 kV/m (vertikalt) utan att strömtätheten överstiger 10 mA/m². En placering vid sidan om fasledare medför att den horisontella komponenten ökar påtagligt, med mer marginell påverkan på strömtätheten. Tidigare exempel visar också att om "människan" står på ett isolerande underlag, så fås en ytterligare begränsning av strömtätheten. Med fötterna på ett 5 cm tjockt isolerande underlag fås en reduktion av strömtätheten av ca 40 % jämfört med om fötterna har kontakt med jord.

Tabell 19 visar att det i ett normalt ställverk för 420 kV finns god marginal upp till det aktuella gränsvärdet på 10 mA/m². Med fältstyrkan in situ som storhet fås en ännu större marginal upp till 100 mV/m.

Geometri Fasledare vid: X=-5,5 m; 0 m; +5,5 m 7,5 m ovan mark U = 420 kV Pelare med tvärsnitt 0,5x0,5 m vid X=5,5 m	E totalt	E verti- kalt	E horisontellt, vinkelrätt mot ledarna	E horisontellt, parallellt med ledarna	Ström- täthet (mA/m ²) Gräns- värde 10 mA/m ²	Fält- styrka, in situ (mV/m) Gräns- värde 100 mV/m
	(kV/m), H = 1,75 m				H = 1,54 m	
Utan pelare, Människa vid X=6,0 m	7,65	7,56	1,18	0,00	1,64	8,22
2,0 m hög pelare. Människa vid X=6,0 m	15,48	6,52	14,04	0,04	0,79	3,96
3,5 m hög pelare. Människa vid X=6,0 m	9,84	2,04	9,63	0,05	0,46	2,30
Utan pelare, Människa vid X=6,5 m	7,59	7,53	0,97	0,00	1,62	8,12
2,0 m hög pelare. Människa vid X=6,5 m	8,39	7,34	4,06	0,01	1,24	6,20
3,5 m hög pelare. Människa vid X=6,5 m	6,29	4,32	4,57	0,10	0,88	4,40

Tabell 19. Beräknade fältstyrkor samt strömtäthet och inre fältstyrka i en modell stående vid X=6,0 respektive vid X=6,5 m. Pelare med tvärsnittet 0,5 x 0,5 m vid X=5,5 m. U=420 kV. $\sigma = 0,2$ S/m.

Tabell 19 visar att den horisontella fältkomponenten i huvudhöjd kan bli avsevärd. I det fall då "människan" står nära, vid X = 6,0 m, den 2 m höga pelaren fås 14 kV/m horisontellt att jämföra med drygt 1 kV/m i det homogena fallet utan pelare. Tabellen visar att strömtäthetens värde i det kritiska halstvärsnittet ändras, men det gör även strömfördelningen i kroppen. I normalfallet, med homogent fält fås högst strömthet i ankelnivå, jämför med Figur 79 och Figur 82. Med placering invid pelaren fås däremot högst ström-täthet i halstvärsnittet, men nivån är lägre än i fallet med ett homogent fält. Figur 84 visar skillnaden mellan de två exponeringsfallen.



Figur 84. Strömtäthet i en axialsymmetrisk modell. Den övre figuren visar strömtätheten när modellen står vid $X=6,0$ m, dvs $0,5$ m utanför ytterfas. Fasledare som tidigare vid $X = -0,5$; $0,5$ m och $+5,5$ m. $U = 420$ kV. Den undre figuren visar strömtätheten med modellen i samma position, men med en jordad pelare rakt under ytterfasen, vid $X = 5,5$ m. Den maximala strömtätheten i halstvårssnittet är i den övre bilden $1,64$ mA/m² och i den nedre bilden $0,79$ mA/m². Notera att färgskalan är olika i de två fallen.

10 Slutsatser och rekommendationer för arbete i höga fält

Den elektriska fältstyrkan (E-fältet) och den magnetiska flödestätheten (B-fältet) har studerats i luftisolerade ställverk för 70, 130, 220 och 420 kV. En äldre och en senare variant av de senare har ingått i studien. Utgångspunkten för studien har varit att beskriva fälten i arbetsmiljön, och då både vid vardagliga inspektioner (rondning) som sker från marknivå och vid väl-planerat underhållsarbete som bl a utförs som s k Arbete Med Spänning. Avstånd mellan spänningsförande anläggningsdel och montören (den exponerade) har relaterats till de fastlagda avstånd som finns för riskområde och närområde för respektive spänningsklass.

Arbetet med att ta fram nya riktlinjer för exponering har pågått under hela projektets löptid och ännu finns inga fastlagda gränsvärden. Ett förslag från juli 2009 har lämnats ut på allmän remiss [4], men det är osäkert om det kommer att antas i denna form. Bedömningarna i denna rapport har därför baserats på detta förslag, med stöd av den tidigare utgåvan av ICNIRP Guidelines (1998) [3]. I båda utgåvorna skiljer man mellan *Gränsvärde* och *Insatsvärde*. Det förra är grundat på direkt och akut påverkan på kroppen och det senare utgörs av mätbara storheter och kopplat till gränsvärdet genom beräkningar. Gränsvärdet har tidigare uttryckts som en strömtäthet (J), med 10 mA/m^2 som gränsvärde vid 50 Hz. I 2009 års utgåva har man valt den inre (in situ) elektriska fältstyrkan (E) som storhet. Gränsvärdet vid 50 Hz är då 100 mV/m . Dessa två storheter är kopplade till varandra via kroppens konduktivitet (σ) enligt sambandet $J = \sigma \cdot E$. Insatsvärdet är detsamma i de två utgåvorna; 10 kV/m respektive $500 \text{ }\mu\text{T}$ för arbetstagare och vid 50 Hz. Det gäller att exponering för fält över insatsvärdet inte nödvändigtvis måste innebära att gränsvärdet överskrids.

Det elektriska fältet har beräknats både analytiskt och numeriskt. De analytiska beräkningarna har utförts med ett lättarbetat program framtagit av EPRI och benämnt "EMF-4 Electric Field of Transmission Lines (3-D)". Programmet kan hantera cylindriska element i tre dimensioner, vilka kan vara både spänningssatta och jordade. Den stora begränsningen ligger i att programmet bara kan hantera kroppar med cirkulärt tvärsnitt och inga kantiga stativ, apparat-skåp eller annat. Programmets möjligheter att beskriva fältet invid jordade strukturer blir därför starkt begränsad.

Mer begränsade beräkningar av den magnetiska flödestätheten har även de genomförts med programvara utvecklad av EPRI, i detta fall med "EMF-7 Magnetic Field (3-D)". Programvaran kan bara hantera strömförande ledare och kan alltså inte ta hänsyn till de eventuella effekter som detaljer av järn kan ha på det magnetiska fältet.

En del av ett 130 kV ställverk har modellerats med en numerisk programvara – Comsol Multiphysics – som beräknar fältet med en Finit-Element Metod. Möjligheten att modellera kantiga detaljer finns, men geometriinmatningen tar lång tid och programmets komplexitet ökar risken för fel.

Det elektriska fältet har också mätts längs ett antal linjer i ställverk för 130, 220, 420 kV äldre och 420 kV senare konstruktion. Vid jämförelse mot beräknade värden visar det sig att skillnaden många gånger är betydande och då framförallt nära jordade apparatstativ och liknande. Närvaron av betydande horisontella fältkomponenter orsakar inte oväntat problem vid användning av den enklare analytiska programvaran. Även vid användning av den numeriska programvaran fås påtagliga differenser, som måste förklaras som ofullkomligheter i den geometriska modellen. Modelleringen blir dock en balansgång mellan vad som är rimligt att lägga i tid på geometriinmatning och vad som beräkningarna kräver för att leverera ett så nära korrekt resultat som möjligt.

De konstaterade problemen med de horisontella fältkomponenterna motiverar att betydelsen av dem ägnas en särskild tanke. Beräkningar har därför genomförts med Comsol Multiphysics och med en människoliknande modell hämtad från en IEC standard [34]. Modellen, som har mått som en något kort svensk man och konstant inre konduktivitet, gör det möjligt att beräkna strömtäthet och inre fältstyrka i bl a det kritiska halstvärnsnittet. Beräkningarna visar att det vertikala fältet har en så avgörande betydelse för strömtätheten, att man i praktiken kan bortse från de horisontella fältkomponenterna vid bedömning av en exponeringssituation. Med detta blir också kartläggningen av horisontella fält mindre kritisk.

Både publicerade studier av homogena och vertikala elektriska fält och strömtäthet och de i detta projekt genomförda beräkningarna med enkla modeller, visar på en relation mellan yttre E-fält och strömtäthet av i storleksordningen 40 – 50 kV/m motsvarande 10 mA/m². I praktiken innebär detta att kravet på en högsta strömtäthet av denna nivå, eller en motsvarande maximal inre fältstyrka av 100 mV/m, inte i sig medför någon begränsning av exponeringen. Gränsen kommer i praktiken att sättas lägre och då vara bl a beroende av hur kortvariga gnisturladdningar upplevs. Vid arbete med erfaren personal torde gränsen ligga vid 20 - 25 kV/m vertikal fältstyrka. Över denna nivå kommer urladdningarna att upplevas som besvärande. Det skall betonas att 20 - 25 kV vertikalt fält är en nivå väl över vad som förekommer 1 - 2 m ovan mark i ett 400 kV ställverk. En begränsning av detta slag påverkar t ex inte rondning.

De beräkningar och mätningar som genomförts för olika ställverkstyper kan sammanfattas enligt följande:

Elektrisk fältstyrka

400 kV

- Fältstyrkan varierar kraftigt. Nära jordade stativ, och då i synnerhet i huvudhöjd, kan fältstyrkan bli hög, lokalt över 20 kV/m. På något större avstånd från stativ etc, kan fältstyrkan på två meters höjd nå upp till drygt 15 kV/m i äldre ställverk och upp till ca 12 kV/m i senare konstruktioner. På en meters höjd når E-fältet upp till ca 10 kV/m.
- Samverkan mellan ledare av samma fas i samlingsskena och fack ger högre fält. Med en luftledning över facket blir sammanlagringseffekten än mer påtaglig (OBS! Gäller ej B-fältet).
- Vid arbete på apparater och ledare i icke spänningssatta fack, kan E-fältet nå över 10 kV/m och lokalt nära apparaterna upp mot 20 kV/m.

- Arbete vid närområdets yttre gräns (5,3 m) kan lokalt medföra exponering för fält i storleksordningen 15 - 20 kV/m och mer allmänt ca 10 kV/m.
- Arbete vid riskområdets yttre gräns (2,8 m) kan medföra exponering för fält i storleksordningen 15 - 45 kV/m. Generellt högre värden mellan faserna än utanför ytterfaserna.
- Arbete med barhandsmetoden på spänningssatta apparater och ledare medför exponering för fält väl överstigande 40 kV/m och i vissa fall överstigande 100 kV/m.

220 kV

- Samverkan mellan ledare av samma fas i samlingsskena och fack ger även i detta fall höga fält. Beräknade maxvärden för två meters höjd och utan hänsyn till apparatstativ mm ligger på knappt 15 kV/m. Uppmätta värden ligger i allmänhet lägre än de beräknade och ligger endast mycket lokalt över 10 kV/m
- Närområdets yttre gräns (3,0 m) sammanfaller i stort med mätthöjden två meter, då ledarna till stor del ligger på 4,5 till 5 meters höjd.
- Vid riskområdets yttre gräns (1,6 m) är fältstyrkan vanligen 15 - 20 kV/m.

130 kV

- Samverkan mellan ledare av samma fas i samlingsskena och fack kan lokalt ge upphov till E-fält överstigande 5 kV/m på 2 meters höjd. Lokalt kan högre värden uppträda nära apparatstativ och liknande.
- Vid den yttre gränsen för riskområdet (1,1 m) fås lokalt E-fält som närmar sig 20 kV/m. Fält överstigande 15 kV synes vara vanligt förekommande.

70 kV

- Samverkan mellan ledare av samma fas i samlingsskena och fack ger högre fält. I detta fall upp mot 5 kV/m på två meters höjd.
- Vid den yttre gränsen för riskområdet (0,75 m) fås lokalt E-fält som något överstiger 15 kV/m.

Magnetisk flödestäthet

För den magnetiska flödestätheten är det svårt att ange några typiska värden beroende på osäkerheten om strömmens storlek. En beräkning baserad på märkström torde ge mycket konservativa rekommendationer om minsta arbetsavstånd. Den följande redovisning har baserats på märkström, men kan enkelt räknas om till annan lägre ström då resultatet är direkt skalbart. Beräkningarna har utgått från en enkel geometri; en horisontell samlings-skena

med en avgrening i rät vinkel och på något lägre höjd. Avstånd mellan faser och höjder har anpassats till respektive spänningsnivå.

Tabell 17 visar att flödestätheten 2 m ovan mark och vid 100 % märkström alltid understiger insatsvärdet på 500 μT . Endast i ett par fall når den upp till 200 μT .

Arbete utanför riskområdets yttre gräns skall endast i undantagsfall kunna innebära exponering för fält överstigande 500 μT . Generellt fås högre fält från de tungt belastade samlingsskenorna, än vid arbete i facken. Vid 50 % av märkström, som är en mer rimlig belastning, kommer fältet vid riskområdets gräns att ligga väl under 500 μT .

Arbete innanför riskområdets yttre gräns kan medföra exponering över insatsvärdet 500 μT , men sådant arbete blir endast aktuellt vid Arbete Med Spänning och speciellt då vid arbete med Barhandsmetoden. I dessa fall kan arbetaren befinna sig på bara någon decimeters avstånd från ledaren och därtill vara ännu närmare med armar och händer.

Om bedömningen görs mot det av ICNIRP fastlagda gränsvärdet (Basic restriction) på 10 mA/m^2 [3] eller 100 mV/m [4], kommer bara utpräglat barhandsarbete att kunna medföra exponering över acceptabla nivåer.

Graden av exponering för fält i arbetslivet är till viss del en planeringsfråga. Genom omsorgsfull planering kan arbetet ibland utföras snabbare och exponeringen begränsas. Driftläggningen kan eventuellt anpassas så att strömbelastning och exponering för magnetiska fält blir mindre. Verktyg kan väljas så att avstånden kan ökas, och exponeringen minskas på detta sätt.

Exponering för magnetfält kan minskas genom att begränsa belastningen och genom att upprätthålla ett visst miniavstånd till ledaren. Yttre skydd i form av kläder och skärmar för magnetfält har diskuterats, men ännu finns inget praktiskt användbart på marknaden.

Situationen är något lättare när det gäller att begränsa de elektriska fälten. Enklast är givetvis att välja en position som ger liten exponering, men olika typer av barriärer ger också ett bra skydd. Jordade skärmlinor kan användas som ett fast skydd i ställverk, även om placeringen kan bli svår om de inte skall vara i vägen. Ett alternativ är flyttbara skärmar av metallnät som skyddar bara den just då aktuella arbetsplatsen. Skärmarnas storlek och placering måste givetvis anpassas till arbetsuppgiften och i praktiken torde de bara bli användbara vid en längre tids arbete på samma plats. För de mer extrema exponeringsfallen, som vid Barhandsarbete, finns så kallade ledande dräkter som mycket effektivt avskärmar det elektriska fältet. Dräkterna är dyra och inte lämpliga att ta till vid normalt arbete i ställverk. För det mer vardagliga arbetet finns betydligt enklare alternativ, som skor med ledande sulor och overaller med ledande band eller revärer. Sådana kläder minskar risken för besvärande gnisturladdningar, men skall användas med eftertanke. Enbart skor med ledande sulor ger god kontakt med jord och därmed höga strömmar genom kroppen. Skor av detta slag skall kombineras med en overall med ledande band, så att strömmarna går i dessa och inte inne i kroppen.

11 Referenser

- 1 Larsson, Anette och Olsson, Göran: Arbete i höga elektriska och magnetiska fält. Luftledning 70 – 400 kV. Elforsk rapport 09.99.
- 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 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.
- 4 Draft ICNIRP Guidelines. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz). 29 July 2009.
- 5 Transmission Line Reference Book. 345 kV and Above. EPRI. First Edition 1975. Second Edition 1982 and Third Edition 2005.
- 6 Lövstrand, Karl Gunnar och Bergström, Sven: Exposition för elektriska fält. En kartläggning av den elektrofysikaliska arbetsmiljön i ställverk. Arbete och Hälsa. 1980:4.
- 7 Knave, B; Gamberale, F; Bergström, S; Birke, E; Iregren, A; Kolmodin-Hedman, B och Wennberg A: Long-term exposure to electric fields. A cross-sectional epidemiologic investigation of occupationally exposed workers in high-voltage substations. Electra. No 65. 1979. pp 41-54.
- 8 E-fält – deras inverkan och hur de undviks.
Manuskript: K G Lövstrand, Institutet för högspänningsforskning, E Birke, Vattenfall, P Å Jansson, Älvkarleby Kraftverk och U Östman, Sydkraft. Bearbetning och produktion: Utbildningsproduktion AB, Malmö. Tryckår okänt.
- 9 Korpinen, L; Isokorpi, J and Keikko, T: Electric and magnetic fields from electric power systems in living and working environment. ISH. High Voltage Engineering Symposium, 22-27 Aug 1999, Conf. Publ. No. 467. No. 2.99.P6.
- 10 Isokorpi, J; Keikko, T and Korpinen, L: Power frequency electric fields at a 400 kV substation. ISH. High Voltage Engineering Symposium, 22-27 Aug 1999, Conf. Publ. No. 467. No. 2.107.P6.
- 11 Okubo, H; Goto, N; Matsumoto, A; Shimizu, M and Kato, K: Magnetic field distribution on power line current in 500/275 kV open-air substation. ISH. High Voltage Engineering Symposium, 2001. No. 1-13.
- 12 Sauramäki, T; Keikko, T; Kuusiluoma, S and Korpinen, L: Exposure to Electric and magnetic Fields at 110 kV Gas Insulated Substation (GIS). IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition. 2002. Vol 2. pp 1226-1229.
- 13 Keikko, T; Kuusiluoma, S; Sauramäki, T and Korpinen, L: Comparison of Electric and magnetic Fields near 400 kV Electric Substation with Exposure

Recommendations of the European Union. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition. 2002. Vol 2. pp 1230-1234.

14 Keikko, T; Kuusiluoma, S and Korpinen L: Exposure to Electric and magnetic Fields of Electric Power Systems. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition. 2002. Vol 3. pp 2352-2356.

15 ZhangQuan, R; JianGuo, W; WenJun, Z; Jun, Y and Bin, M: Measurement of Power Frequency Electric & magnetic Field in a 500kV Substation. ISH. Proceedings of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering. Beijing, China. Aug 25-29. 2005. No. J-61.

16 Långsjö, T.; Latva-Teikari, J.; Kurikka-Oja, J.; Kuussaari, M.; Elovaara, J.; Kuisti, H and Korpinen, L.: Occupational exposure to 50 Hz electric fields at substation. In: Pikaar, R.N. et al. (eds.). 16th World Congress on Ergonomics, IEA 2006, Maastricht, The Netherlands, 10-14 July, 2006.

17 Diaconu, C; Pop, I T and Munteanu, C: The Analysis of the Electric and magnetic Field Distribution Inside a Recently Rehabilitated Substation Belonging to Romanian TSO Company. Cigré. B3-214. 2008. pp 1-7.

18 Safigianni, A. S. and Tsompanidou, C. G.: Electric- and Magnetic-Field Measurements in an Outdoor Electric Power Substation. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 24. No. 1. Jan 2009. pp 38-42.

19 Fracke, J och Åke, J: Magnetiska och elektriska fält i ställverksmiljö. Kartläggning av en äldre anläggning. Institutionen för data- och elektroteknik. Chalmers Lindholmen University College. Examensarbete 2004:17. 2004.

20 Pettersson, A och Österlund, C: Reducering av elektriska fält i ställverksmiljö. Institutionen för Signaler och System. Chalmers Tekniska Högskola. 2005.

21 Cedergren, J: Human contact currents induced by electrical field in Swedish 400 kV substations. Department of Signals and Systems. Chalmers University of Technology. Report No. EX070/2006. 2006.

22 Larsson, A och Olsson, G: Gnisturladdningar och kontaktströmmar. Elforsk rapport 07:36. 2007.

23 Rådets rekommendation av den 12 juli 1999 om begränsning av allmänhetens exponering för elektromagnetiska fält (0Hz – 300 GHz). (1999/519/EG)

24 Statens strålskyddsinstituts allmänna råd om begränsning av allmänhetens exponering för elektromagnetiska fält; beslutade den 28 oktober 2002. SSI FS 2002:3.

25 Proposal for a Directive of the European Parliament and the Council amending Directive 2004/40/EC on minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risk arising from physical agents (electromagnetic fields) (eighteenth individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC). Brussels, 26.10.2007. COM(2007)669 final. 2007/0230(COD).

26 Dawson, T W; Caputa, K and Stuchly, M A: High-Resolution Organ Dosimetry for Human Exposure to Low-Frequency Electric Fields. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 13. No. 2 April 1998. pp 366-373.

- 27 Dawson, T W and Stuchly, Maria A: High Resolution Organ Dosimetry for Human Exposure to Low-Frequency Magnetic Fields: IEEE Transactions on Magnetics. Vol 34. No. 3. May 1998. pp 708-718.
- 28 Dawson, T W and Stuchly, Maria, A: Effects of skeletal muscle anisotropy on human organ dosimetry under 60 Hz uniform magnetic exposure. Physics in medicine and biology. No. 43. 1998. pp 1059-1074.
- 29 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.
- 30 Bahr, A; Bolz, T and Hennes, C: Numerical dosimetry ELF: Accuracy of the method, variability of models and parameters, and the implication for quantifying guidelines. Health Physics. No. 92(6). 2007. pp 521-530.
- 31 Hirata, A; Wake, K; Watanabe, S and Taki, Masao: In-situ electric field and current density in Japanese male and female models for uniform magnetic field exposures. Radiation Protection Dosimetry. Vol. 135. No. 4. 2009. pp 272-275.
- 32 Stuchly, M A and Dawson, T W: Human body exposure to power lines: Relation of induced quantities to external magnetic fields. Health Physics. Sep 2002. Vol. 83. No. 3. 2002. pp 333-340.
- 33 SS-EN 50 110-1. Utgåva 2. 2005-06-15. Skötsel av elektriska anläggningar.
- 34 IEC 62226-3-1. Ed 1. 2007-05. Exposure to electric or magnetic fields in the low and intermediate range – Methods for calculating the current density and internal electric field induced in the human body – Part 3.1: Exposure to electric fields – Analytical and 2D numerical models.