



Elektriska och magnetiska fält i arbetsmiljön

Inverkan av nytt regelverk

Elforsk rapport 12:45



Göran Olsson

Juli 2012

ELFORSK

Elektriska och magnetiska fält i arbetsmiljön

Inverkan av nytt regelverk

Elforsk rapport 12:45

Förord

Elforsk har sedan 1990-talet bedrivit verksamhet inom området kraftfrekventa elektriska och magnetiska fält (EMF). Detta projekt påbörjades inom EMF-programmet 2010. Programmet har omfattat bl.a. forskning kring arbetsmiljöförhållanden med avseende på elektriska och magnetiska fält vid arbete under spänning i kraftledningsmiljö mm.

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

Eskil Agneholm (ordf.), Fortum Distribution

Fredrik Roos, E.ON Elnät Sverige, Lennart Engström och Morgan Börjesson, Vattenfall

Anna Sedvall Wiklund och Lars Wallin, Svenska Kraftnät

Mats Wahlberg, Skellefteå Energi

Bengt Hanell, Elforsk

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

Stockholm juli 2012

Bengt Hanell

Elforsk AB

Programområde Överföring och distribution

Sammanfattning

Arbete i bl a ställverk och i luftledningsmiljö medför exponering för elektriska och magnetiska fält. I flertalet fall är nivån av de magnetiska fälten måttlig jämfört med befintliga internationella regelverk och enligt de förslag till ett EU-direktiv om elektriska och magnetiska fält som nu diskuteras. Nivån av förekommande elektriska fält är däremot av samma storleksordning som de som återfinns i dessa riktlinjer. Det finns ett flertal arbetssituationer som väl motiverar en noggrannare genomgång av förekommande fält, av de olika förslagens innehåll och av de konsekvenser som ett bindande EU-direktiv inom detta område kan förväntas få.

I denna rapport beskrivs tre typer av "fältmiljöer"; luftledningar, ställverk och högspänningskablar. Materialet till denna beskrivning har i huvudsak hämtats från fyra tidigare rapporter utgivna av Elforsk: Gnisturladdningar och kontaktströmmar, Arbete i höga fält – Luftledningar, Arbete i höga fält – Ställverk och från Magnetfält i kabelmiljö. Till detta har även fogats resultatet av en nu genomförd kompletterande litteraturoversikt.

I rapporten ges en genomgång av förekommande regelverk för exponering och av de förslag till EMF-direktiv som diskuteras. Här ligger en betydande svårighet – det finns ännu inte något slutgiltigt förslag till EMF-direktiv och tidplanen är osäker. Införandetidpunkten har skjutits framåt i omgångar, nu talas det om 2014 som ett troligt alternativ. De rekommendationer för arbete i höga fält som ges här i rapporten har därför måst göras "flexibla".

Vi kommer framgent att ha två regelverk för elektriska och magnetiska fält. Dels de "Guidelines" för exponering som redan publicerats av strålskyddsorganisationen ICNIRP och dels ett EU-direktiv om EMF. De kommer troligen inte att ha samma exponeringsgränser, vilket kan bli besvärande och utgöra en källa till missförstånd.

Generellt gäller givetvis att man i möjligaste mån skall försöka begränsa sin exponering, både vad det gäller nivå och varaktighet.

Den lägsta föreslagna begränsningen för elektriska fält, 10 kV/m, blir högst problematisk att uppfylla. Nästa nivå, 20 kV/m, ger större rörelsefrihet och kan i stort sett förväntas fungera med dagens arbetsprocedurer. För att klara av alla arbetsuppgifter, krävs dock att man kan hantera förekommande gnisturladdningar på lämpligt sätt. Användning av en enklare E-fältsoverall kan vara en sådan lösning. För arbete i de högsta fältstyrkorna krävs dock en fullgod ledande dräkt.

Föreslagna begränsningar för magnetisk flödestäthet får liten påverkan på arbetet som det utförs idag. När det gäller arbete på luftledningar och i ställverk medför inte aktuella B-fältsnivåer någon begränsning för arbete utanför gränsen för riskområdet. Detta innebär att det är endast vid Arbete Med Spänning och då med barhandsmetoden som magnetfält kan medföra en begränsning. Troligen behöver inte befintliga arbetsprocedurer ändras men vissa instruktioner kan behöva skärpas. Kraven på högsta exponering av lemmar kan komma att kräva ett kortare isolerverktyg. Även instruktioner för arbete med kablar kan behöva kompletteras och troligen behövs ett enklare lyftverktyg för hantering av strömförande kabel.

Summary

Work in substations and close to overhead lines is necessarily associated with the exposure to electric and magnetic fields (EMF). The magnetic field levels are in most cases moderate compared to existing international guidelines for exposure and also to the proposals for a new EU-directive regarding the exposure of workers to EMF. On the other hand, the electric fields levels existing today in working zones and in some public zones are of the same order as the action levels given by these guidelines.

There are a number of specific working procedures that motivates a more careful investigation of existing field levels and also of the intention and consequences of these proposals for a new EU-directive within this field.

Three types of "exposure scenarios" are described in this report; overhead lines, substations and high-voltage cables. These exposure scenarios have been described in four previous reports from Elforsk: "Gnisturladdningar och kontaktströmmar", "Arbete i höga fält – Luftledning", "Arbete i höga fält – Ställverk" and in "Magnetfält i kabelmiljö". The results of an updated literature review give some more input to the chapter regarding the assessment of different exposure situations.

The existing guidelines for exposure and the proposals for a new EU-directive within this field are both discussed in the report. The new EU-directive is unfortunately still an open question and the date for the member states to bring into force necessary law and regulations have now been postponed until 2014. The recommendations given in this report must therefore be given in a "flexible" form, possible to adapt to different future protection levels.

There will in the future certainly be two different guidelines for exposure to EMF, both the "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields" published by the organization ICNIRP and a workers directive from EU. The given limits will probably not be the same and this can certainly be a source for misunderstanding and for other difficulties.

In general, exposure to EMF, should be limited as far as technical and economical possible.

The lowest proposed limitation for electric fields at 10 kV/m will be difficult to comply with. The next level, 20 kV/m, will give increased flexibility and will be possible to maintain with most of the working tasks practiced today. To cover all tasks it will be necessary also to limit the effect of spark-discharges. A conductive suit together with semi-conductive shoes would be an alternative.

The proposed limitations for the magnetic field will have only minor impact on the work performed today. For work on overhead lines and in substations, there will be no limitations for working outside the live-working zone. Restrictions will therefore only be necessary for live-line working and in particular with the bare-hand method. There will probably not be necessary to modify the working procedures, but the working instructions will certainly have to be revised. The limitation for exposure of the limbs may require a short hot-stick. Also the instructions for cable work may have to be revised and a new tool for lifting current carrying cables without touching them with the hands will probably have to be used.

Innehåll

1	Inledning	1
2	Fält i olika arbetsmiljöer	3
2.1	Riskområde och närområde	3
2.2	Luftledning 70 – 400 kV	5
2.3	Luftisolerade ställverk 70 – 420 kV	6
2.4	Gasisolerade ställverk	9
2.5	Nätstationer mm	9
2.6	Kablar	9
3	Riktlinjer för exponering	12
3.1	Kort historik och bakgrund.....	12
3.2	ICNIRP Guidelines 1998	12
3.3	ICNIRP Guidelines 2010	15
3.4	Riktlinjer från EU och från svensk myndighet.....	17
3.5	Översikt av riktlinjer för 50 Hz exponering	26
3.6	Förslag från CEEMET IEG - januari 2012	27
3.7	Referenser om dosimetri från ICNIRP Guidelines 2010	27
3.8	Strömtäthet och elektrisk fältstyrka – en jämförelse av två storheter	33
3.9	Jordad eller ojordad modell	34
3.10	Övrig litteratur till stöd vid en bedömning av en exponeringssituation ...	36
3.11	Betydelsen av ett elektriskt fält som ej är vertikalt	37
3.12	Standarder	46
4	Gnisturladdningar och kontakt-strömmar	52
4.1	Hur människor reagerar på gnisturladdningar och kontaktströmmar.....	53
4.2	Kontaktströmmar från människor	57
4.3	Gnisturladdningar från människor	61
4.4	Kontaktströmmar från större föremål	63
4.5	Gnisturladdningar från större föremål	66
5	Rekommendationer för arbete i höga fält	72
5.1	Bedömningsgrunder.....	72
5.2	Risk- och närområde.....	73
5.3	Arbete i höga elektriska fält	74
5.4	Arbete i höga magnetiska fält.....	76
6	Referenser	80

1 Inledning

Arbete i ställverk och i luftledningsmiljö medför exponering för elektriska och magnetiska fält. Nivån av det magnetiska fältet (flödestätheten) är i allmänhet måttlig jämfört det s k insatsvärdet för omedelbara effekter på människokroppen på 500 μT vid 50 Hz, som anges i dagens riktlinjer för exponering. Det elektriska fältet, däremot, är inte sällan av samma storleksordning som motsvarande insatsvärde för omedelbara effekter på 10 kV/m.

Begreppet insatsvärde kommer från de internationella riktlinjer för exponering som tagits fram av organisationen ICNIRP och som ligger till grund för EUs arbete med att ta fram ett direktiv för begränsning av arbetstagarens exponering för elektriska och magnetiska fält. Det internationella arbetet har tagit lång tid men målet är nu att ha ett Europadirektiv inklusive nationella föreskrifter klara till våren 2014.

Ett Europadirektiv om elektriska och magnetiska fält kommer att omarbetas till en svensk nationell föreskrift och blir därmed ett tvingande arbetsmiljödokument. Arbetsgången kan närmast jämföras med motsvarande för vibrationer och buller. För vibrationer finns EU-direktivet 2002/44/EG [1] och motsvarande svensk föreskrift AFS 2005:15 [2], utgiven av Arbetsmiljöverket. För buller finns direktivet 2003/10/EG [3] och motsvarande svenska föreskrift AFS 2005:16 [4]. Det kommande EMF-direktivet kommer säkerligen att uppvisa stora likheter med vibrations- och bulldirektiven, då de alla följer av EUs ramdirektiv 89/391/EEG "Åtgärder för att främja förbättringar av arbetstagarnas säkerhet och hälsa i arbetslivet" [5].

Det finns med andra ord all anledning att förmoda Sverige inom något år kommer att få tvingande begränsningar för elektriska och magnetiska fält i arbetslivet. Begränsningar för det elektriska fältet kan då komma att få återverkningar på val av arbetsmetoder och arbetssätt vid underhåll av kraftledning och ställverk.

I den följande framställningen ges exempel på några elkraftmiljöer som kan medföra elektriska och magnetiska fält av påtaglig amplitud. Vidare ges en beskrivning av det internationella regelverket för EMF och även hur detta har utvecklats sedan slutet av 1990-talet. Några speciella exponeringssituationer diskuteras också i samband med detta.

Det måste avslutningsvis tilläggas att det ännu inte finns ett färdigt EU-direktiv för EMF. Går allt som planerat finns ett sådant klart först våren 2014, men ytterligare förseningar kan inte uteslutas. I väntan på klara riktlinjer finns därför ännu en liten kvardröjande osäkerhet om vilka regler som skall gälla inom detta område de närmaste åren.

Denna rapport behandlar endast kraftfrekventa, 50 och 60 Hz, fält, ej statiska fält från likströmsinstallationer och inte heller fält av högre frekvens från induktionsugnar.

2 Fält i olika arbetsmiljöer

Inom ramen för två tidigare projekt för Elforsk har förekommande elektriska och magnetiska fält vid kraftledningar [6] och i ställverk [7] kartlagts genom beräkningar och mätningar. Inom ett annat projekt har även de magnetiska fälten invid kablar beskrivits [8]. Ambitionen har varit beskriva fältens nivåer i samband med "vanligt arbete i elmiljö", men även vid arbete nära spänningsförande ledare, d v s i samband med Arbete Med Spänning och Arbete Nära Spänning. Någon exponeringstid för fält har inte mätts, möjligen i något fall antytts som kortvarig, men inte mer utförligt än så. Anledningen är att projekten har varit inriktade på omedelbara effekter på människokroppen av förhållandevis höga fält.

Nedan ger en kortfattad genomgång av förekommande fält och som till stor del bygger på ovan nämnda rapporter.

2.1 Riskområde och närområde

Området invid spänningssatta delar kan delas in i Riskområde och Närområde. Riskområdet är närmast och utanför detta finns Närområdet, se Figur 1. Avståndet från spänningssatt del och den yttre gränsen för respektive område beror av spänningsnivån och av en bedömning man gjort av risken för överlag och behovet av tillägg för ofrivilliga kroppsrörelser mm. Avstånden för vanligen förekommande spänningsnivåer ges i SS-EN 50 110-1:2005 [9] och återges i Tabell 1.

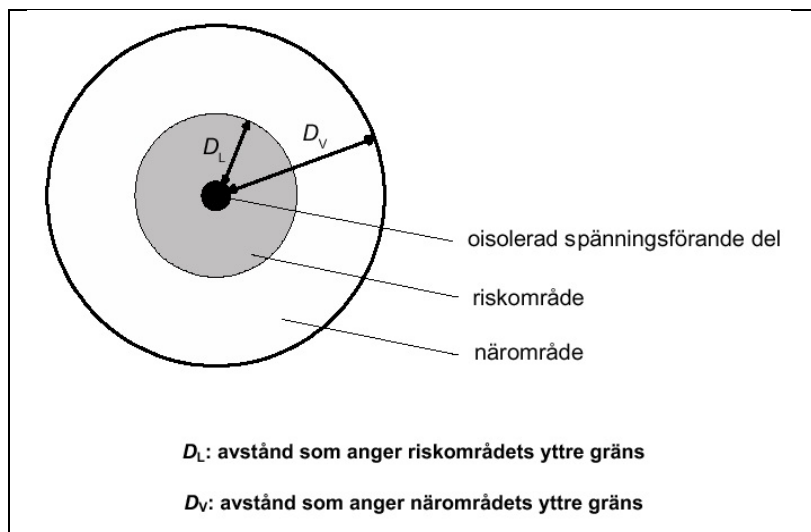
Indelning i Risk- och Närområde styr typen av arbete.

Arbete Utan Spänning innebär arbete på en elektrisk anläggning som varken är spänningssatt eller uppladdad och som utförs efter att åtgärder vidtagits för att förebygga elektrisk fara.

Arbete Nära Spänning är en metod som medför att arbetaren kommer inom närområdet med kroppsdel eller med verktyg, men utan att komma inom gränsen för riskområdet.

Arbete som medför att arbetstagaren kommer inom gränsen för riskområdet med kroppsdel eller verktyg benämns Arbete Med Spänning, AMS. Sådant arbete kan bedrivas med *Barhandsmetoden*, som medför direktkontakt med spänningsförande anläggningsdel. Med *Isolerstångsmetoden* sker arbetet på ett bestämt avstånd och med isolerande stänger. Med den tredje arbetsmetoden – *Isolerhandskmetoden* – är arbetaren i direkt mekanisk kontakt med spänningsförande delar men är elektriskt skyddad av isolerande handskar och eventuellt av dukar och överdrag av isolermaterial.

Vid Arbete Nära Spänning och vid Arbete Med Spänning krävs omsorgsfull planering, mer eller mindre omfattande förberedelser och framförallt vid AMS, personal med särskild kompetens. Detta innebär att området nära spänningssatta delar och med förhållandevis höga elektriska fält är begränsat till personal med erfarenhet och kompetens. När det gäller magnetfält är situationen något annorlunda. Arbete inom Risk- och Närområde kan medföra



Figur 1. Riskområde och närområde enligt SS-EN 50 110-1 [9].

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 1. Avstånd till Risk- och Närområdets yttre gräns enligt SS-EN 50 110-1:2005 [9]. Värden för 300, 400 och 420 kV är framtagna genom linjär interpolation.

exponering för förhöjda magnetfält, men det gäller även arbete nära kablar och bl a även i ställverk för låg- och mellanspänning. I allmänhet är dock nivåerna måttligt förhöjda och endast i undantagsfall överstiger de förekommande begränsningar.

Utöver dessa former av mer reglerat arbete finns s k Icke elektriskt arbete, som kan vara byggnadsarbete, transporter eller annat arbete framförallt under eller invid luftledningar. Vid sådant arbete kan personal och utrustning befinna sig på marknivå eller någon meter däröver.

2.2 Luftledningar 70 – 400 kV

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

- Zon 1: Fält längs markytan och några meter däröver. Inverkan av stolpar och andra ledande konstruktioner är liten
- Zon 2: Fält nära stolpben och regler. Fältet kan vara kraftigt påverkat. Den elektriska fältstyrkan kan vara fördubblad invid ett jordat stolpben.
- Zon 3: Fält nära faslinorna. Fältet är högt och inverkan av stolpar och jordade konstruktioner är liten.

Elektrisk fältstyrka

70 kV

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

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

130 kV

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

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

220 kV

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

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

400 kV

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

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

Magnetisk flödestäthet 70/130/220/400 kV

Det är svårare att dra generella slutsatser om den magnetiska flödestätheten eftersom strömmen kan anta högst skilda värden. Vid 500 A och med ledningarna i minimihöjd kan flödestätheten 2 m ovan mark uppgå till som högst ca 25 μ T (77 kV och 4 m fasavstånd). Vid 1 000 A ökar dessa värden för 400 kV ledningarna till strax över 35 μ T.

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

B-fältet ökar något invid detaljer av ferromagnetiskt material men ökningen är måttlig vid aktuella avstånd och fältnivåer.

Den magnetiska flödestätheten blir ett problem sett till nivån 500 μ T endast vid barhandsarbete och möjligen vid arbete med isolerande handskar, när montören kommer nära eller i direktkontakt med den strömförande faslinan. Framförallt händerna men ibland även bälten kan vid dessa arbetsoperationer komma mycket nära och exponeras för kraftigt förhöjda magnetfält.

2.3 Luftisolerade ställverk 70 – 420 kV**Elektrisk fältstyrka****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.

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.

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 (vid 1,6 m) är fältstyrkan vanligen 15 - 20 kV/m.

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 i båda fallen 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.

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

Tabell 2 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 .

Källa för B-fältet / Belastning i A	Avstånd i m till B-fält < 500 μT	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 2. Beräknad magnetisk flödestäthet 70 – 420 kV.

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.

Det skall tilläggas att reaktorer har lämnats utanför denna redovisning. Det magnetiska fältet från en sådan luftspole, eller vanligen system av spolar, kan bli betydande. Fält i storleksordning några hundra μT har mätts upp i närheten av sådana installationer. De är dock i allmänhet placerade innanför en

särskild inhägnad och då fältet avtar snabbt från reaktorerna, är påverkan på det övriga ställverksområdet mera måttlig.

2.4 Gasisolerade ställverk

Elektrisk fältstyrka

I princip förekommer inga elektriska fält inom de gasisolerade och kapslade delarna av ställverken. Vid övergången till friledning kan ställverken betraktas som ett konventionellt öppet ställverk, med elektriska fält.

Magnetisk flödestäthet

Den magnetiska flödestätheten varierar kraftigt invid de gasisolerade ställverken. Magnetiska fält överstigande 100 μT kan förekomma och lokalt även överstigande 1000 μT . En finsk undersökning visar att medexponeringen vid arbete i GIS-ställverk är låg [10]; maximalt 1 μT under 50 % av arbetstiden och >5 μT under upp till 7 % av arbetstiden.

2.5 Nätstationer mm

I en serie tidigare rapporter från Elforsk har magnetfältsnivån studerats i olika former av nätstationer och hur den påverkas av placering och utformning av skenstråk och kabelförband, av ställverkfackens utformning och av valet av transformortyp [11], [12], [13]. Rapporterna har i huvudsak varit inriktade på magnetfältsnivåer utanför själva stationen, men ger också information om arbetsmiljön inne i stationen.

De elektriska fälten vid den här typen av anläggningar är generellt låga, men de magnetiska är betydligt mer varierande och synnerligen lokala. Vid mätningar i huvudhöjd (ca 1,75 m ovan golv) i en modern 10/0,4 kV station har 70 - 250 μT mätts upp invid ett kabelförband mellan transformator och lågspänningsfördelning. Framför transformatorn på 1250 kVA var fältet 40–60 μT och framför lågspänningsfördelningen 20–60 μT . Mätningarna har visat på stora lokala variationer men redovisade värden är typiska för positioner där man kan ha anledning att vistas, om än högst tillfälligt.

2.6 Kablar

Elektriska fält av någon storlek förekommer inte i ren kabelmiljö. Vid övergång från högspänningskabel till luftledning kan E-fälten bli betydande och närmast betraktas som fälten i ett utomhusställverk för motsvarande spänningsnivå.

Förekommande magnetfält är beroende av hur faserna har arrangerats, av belastningsströmmen och givetvis av avståndet till kabelförbandet. Generellt ger litet fasavstånd ett förhållandevis lågt magnetfält. 3-fas kablar är i detta avseende därför att föredra, men hänsyn måste också ofta tas till belastbarheten. Mätningar invid två parallella kabelförband med triangulär förläggning och för 220 kV har visat att magnetfältsnivån sjunker fort vid ökande avstånd från förbanden. Endast mycket nära kablarna kan fältet överstiga 500 μT . En möjligen kritisk arbetssituation skulle kunna vara skarvning eller annat arbete på ett förband samtidigt som all last måste överföras på det

andra. En grov uppskattning av geometrin ger att magnetfältsnivån i ett sådant fall skulle kunna uppgå till 200 – 400 μT vid arbetsplatsen.

3 Riktlinjer för exponering

3.1 Kort historik och bakgrund

ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) är en av de organisationer som arbetar med att ta fram riktlinjer för exponering för EMF. Inom ICNIRP finns internationell kompetens inom skilda områden, bl a inom medicin, biologi och epidemiologi. Arbetet bedrivs i nära samarbete med WHO, ILO, IRPA m fl internationella organisationer. I ICNIRPs uppdrag ingår att ta fram riktlinjer för exponering inom hela frekvensområdet, från statiska fält upp till 300 GHz. 1998 publicerade ICNIRP riktlinjer för exponering för växelfält upp till 300 GHz [14]. Denna utgåva kom att ligga till grund för en EU-rekommendation (1999) om allmänhetens exponering [15], för bl a en svensk föreskrift [16] och för det första förslaget (2004) till EU-direktiv för arbetstagarens exponering [17]. Det tekniska innehållet i EU-dokumentet, d v s själva begränsningarna, var identiska med ICNIRP 1998. Kunskapen om i synnerhet dosimetri växte med åren och därmed kom också önskemål om en teknisk revision av ICNIRPs riktlinjer. I december 2010 publicerades så den andra omarbetade utgåvan [18]. Arbetet med att ta fram ett nytt förslag till EU-direktiv för arbetstagare hade då pågått ett antal år. Förslaget från 2004 hade kritiserats på flera punkter och i november 2010 [19] las ett förslag fram och i mars 2011 [20] kom ett andra förslag. Slutligen, i juni 2011 kom den Europeiska kommissionens förslag [21]. Nytt i dessa tre förslag är att de skiljer sig på flera punkter från ICNIRPs riktlinjer, både vad det gäller det mer administrativa innehållet och nivåer. Även om det inte finns ett slutgiltigt förslag till EU-direktiv, är det ändå troligt att det framgent kommer att finnas två något olika uppsättningar med riktlinjer för exponering. Detta kan tyckas olyckligt då dubbla budskap riskerar att leda till missförstånd, men måste accepteras då EU-direktivet mer än ICNIRP Guidelines är ett resultat av förhandlingar mellan olika intressegrupper.

Den här något oklara situationen motiverar en mer detaljerad genomgång av ICNIRPs båda utgåvor och EUs förslag till direktiv för EMF.

3.2 ICNIRP Guidelines 1998

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 långtids-effekter behandlas alltså inte. I dokumentet definieras två typer av riktlinjer – Basic restrictions och Reference levels. Basic restrictions eller gränsvärden baseras direkt på erkänd påverkan på människokroppen och uttrycks i det lägre frekvensområdet som en strömtäthet (mA/m^2) inne i kroppen. Denna 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 förhållandevis enkla matematiska modeller. Relationen mellan Reference levels och Basic restrictions är sådan att om aktuell exponering inte överskrider Reference levels, så

överskrider inte heller Basic restrictions. Däremot, om Reference levels överskrider, så behöver inte nödvändigtvis Basic restrictions överskridas. Konsekvensen av detta blir att om Reference levels överskrider, så är det nödvändigt att kontrollera om även Basic restrictions överskrider.

I sammanfattningen över biologiska och epidemiologiska studier för frekvensområdet 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 3. Basic restrictions eller gränsvärden, ICNIRP 1998 [14].

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 inplantat.

Utifrån gränsvärdet har de elektriska och magnetiska fälten beräknats (referensnivåer eller insatsvärden). Detta har skett under antagandet om maximal koppling mellan yttre fält och inre 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 4. Referensnivåer eller insatsvärden för arbetstagare, ICNIRP 1998 [14].

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 5. Referensnivåer eller insatsvärden för allmänheten, ICNIRP 1998 [14].

För den kontinuerliga s k kontaktström som kan uppkomma vid kontakt med ett föremål på annan potential ger ICNIRP 1998 följande begränsning. Nivån är inte satt för att skydda mot perception utan mot smärtsamma upplevelser.

Exponerad grupp	Frekvensområde	Kontaktström (mA)
Arbetstagare	- 2,5 kHz	1 mA
	2,5 – 100 kHz	0,4 f
Allmänheten	- 2,5 kHz	0,5 mA
	2,5 – 100 kHz	0,2 f

f är frekvensen i kHz.

Tabell 6. Kontaktströmmar. ICNIRP 1998 [14].

3.3 ICNIRP Guidelines 2010

ICNIRPs nya riktlinjer från 2010 [18] bygger, precis som tidigare utgåva, enbart på kända omedelbara effekter men man säger i ett bilagt Fact Sheet följande som säkerligen kommer att diskuteras vidare:

ICNIRP is well aware that these epidemiological results have triggered concern within the population in many countries. It is ICNIRP's view, that this concern is best addressed within the national risk management framework. Risk management in general is based on many different aspects, including social, economic, and political issues. ICNIRP in this context provides scientifically based advice only.

För de omedelbara effekterna gäller samma indelning i Arbetstagare och Allmänhet som tidigare och likaså samma uppdelning i Basic restrictions (gränsvärden) resp i Reference levels (insatsvärden). Nytt är däremot uppdelningen i CNS (centrala nervsystemet: hjärnan och näthinnan) och i övriga kroppsdelar. Storheten inre fältstyrka (V/m) har rekommenderats som mer lämplig än den tidigare använda strömtätheten (mA/m²).

Grupp	Kroppsdel	Frekvensområde	Inre fältstyrka (V/m)
Arbetstagare	Centrala nervsystemet, CNS	1 – 10 Hz	0,5 / f
		10 – 25 Hz	0,05
		25 - 400 Hz	$2 \times 10^{-3} f$
		400 Hz – 3 kHz	0,8
		50 Hz	0,1
	Övriga delar av kroppen	1 Hz – 3 kHz	0,8
Allmänheten	Centrala nervsystemet, CNS	1 – 10 Hz	0,1 / f
		10 - 25 Hz	0,01
		25 - 1 000 Hz	$4 \times 10^{-4} f$
		1000 Hz – 3 kHz	0,4
		50 Hz	0,02
	Övriga delar av kroppen	1 Hz – 3 kHz	0,4

f är frekvensen i Hz.

Tabell 7. Gränsvärden ICNIRP 2010 [18].

För arbetstagare och frekvensområdet 10 - 25 Hz baseras gränsvärdet för exponering av CNS på tröskelnivån för s k fosfener, dvs ljusfenomen i ögats randzoner, som kan uppkomma vid inre fältstyrkor överstigande 50 mV/m. Det antas att en nivå som skyddar mot uppkomsten av fosfener, även skyddar mot varje tänkbar påverkan på hjärnan i övrigt. Tröskelnivån för fosfener ökar snabbt med ökande frekvens, från ett minsta värde på 50 mV/m nära 20 Hz till 800 mV/m vid 400 Hz. Vid exponering av övriga kroppsdelar och för frekvenser upp till 3 kHz, sätts gränsen till 800 mV/m motsvarande tröskelnivån för stimulans av det perifera nervsystemet, inklusive en säkerhetsfaktor på 5. För allmänheten tillkommer ytterligare en säkerhetsfaktor på 5 för frekvensområdet 10 - 25 Hz och en faktor 10 för högre frekvenser.

En viktig fråga när det gäller beräkning av den inre fältstyrkan i kroppen är hur värdena skall medelvärdesbildas över olika organ. Dagens matematiska modeller medger hög beräkningsnoggrannhet, med liten "maskvidd" eller kort avstånd mellan beräkningspunkterna. Detta kan dock ge upphov olika randfenomen, dvs lokala extremvärden som kan antas sakna biologisk relevans. I ICNIRP 2010 rekommenderas därför att beräknade fältstyrkor uttrycks som en fältvektor representativ för en kub med sidan 2 mm. För ett visst organ rekommenderas att man bortser från de allra högsta värdena och jämför gränsvärdet enligt Tabell 7 med den 99th percentilen av den inre elektriska fältstyrkan.

Då den inre fältstyrkan är svår att mäta har man, precis som tidigare, beräknat s k referensvärden. Man har här använt numeriska data publicerade av bl a Dimbylow för att få en mer realistisk relation mellan yttre fält och inre storhet än i den tidigare utgåvan (se vidare i avsnitt 3.7). Dock har man valt de exponeringsvillkor som ger maximal koppling mellan yttre fält och inre storhet. På detta sätt uppnås den högsta skyddsnivån. I Tabell 8 nedan redovisas aktuella referensvärden för arbetstagare och allmänhet.

De nya riktlinjerna ger även en kort betraktelse över sambandet mellan yttre fält och den fältstyrka som därav uppstår inne i kroppen. De är enkla och väl värda att återge i sammandrag:

- För ett givet E-fält fås den högsta inre fältstyrkan när kroppen har full kontakt via fötterna med underlaget (jord). Den lägsta fältstyrkan fås med kroppen "isolerad".
- Den totala ström som flyter från kropp till underlag är en funktion av kroppens form, kroppsställning och det yttre E-fältet. Högst ström fås med ett fält riktat huvud-fot.
- För ett givet magnetfält av viss styrka och riktning, fås högre inducerad ström i "stora" människor än i små. Detta då en större kroppshydda medger större strömkretsar
- Den inducerade strömmen i kroppen beror av det magnetiska fältets riktning och högst ström fås i merparten av kroppens vävnader då fältet är riktat bröst-rygg. Lägst ström fås med fältet riktat huvud-fot.
- Fördelningen av strömmar i kroppen bestäms de olika organens konduktivitet.

Grupp	Frekvensområde, f	E-fält (kV/m)	Magnetisk flödestäthet (T)
Arbetstagare	1 – 8 Hz	20	$0,2 / f^2$
	8 -25 Hz	20	$2,5 \times 10^{-2} / f$
	25 – 300 Hz	$5 \times 10^2 / f$	1×10^{-3}
	300 Hz – 3 kHz	$5 \times 10^2 / f$	$0,3 / f$
	50 Hz	10	1×10^{-3}
Allmänheten	1 – 8 Hz	5	$4 \times 10^{-2} / f^2$
	8 -25 Hz	5	$5 \times 10^{-3} / f$
	25 - 50 Hz	5	2×10^{-4}
	50 - 400 Hz	$2,5 \times 10^2 / f$	2×10^{-4}
	400 Hz – 3 kHz	$2,5 \times 10^2 / f$	$8 \times 10^{-2} / f$
	50 Hz	5	0,0002

f är frekvensen i Hz.

Tabell 8. Referensvärden. ICNIRP 2010 [18].

För kontaktströmmar gäller samma värden som tidigare, se Tabell 9.

Exponerad grupp	Frekvensområde	Kontaktström (mA)
Arbetstagare	- 2,5 kHz	1 mA
	2,5 – 100 kHz	$0,4 f$
Allmänheten	- 2,5 kHz	0,5 mA
	2,5 – 100 kHz	$0,2 f$

Tabell 9. Kontaktströmmar. ICNIRP 2010 [18].

3.4 Riktlinjer från EU och från svensk myndighet

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

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 [15]. 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 [16]. Det sägs i denna föreskrift att fält som medför att de grundläggande begränsningarna överskrids, inte *bör* förekomma i något område som allmänheten vistas i. Likaså sägs att fält överstigande referensnivåerna inte *bör* förekomma i något område som allmänheten vistas i. Det sägs också att de allmänna råden inte skall 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 [17] med minimikrav för att skydda arbetstagare mot sådana hälso- och säkerhetsrisker som uppstår eller kan uppstå vid exponering för elektromagnetiska fält i samband med arbete (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 av detta senarelades införandetidpunkten för EU-direktivet med fyra år, från 2008 fram till den 30 april 2012.

Nu i maj 2012 pågår dock ännu arbetet med att finna formuleringar och exponeringsnivåer som kan vinna allmän acceptans och förståelse. Införandetidpunkten har skjutits fram ytterligare två år, till preliminärt den 30 april 2014. Ett problem är att det nu inte finns ett utan flera förslag och ingetdera är till sitt tekniska innehåll identiskt med ICNIRP Guidelines, vilket riskerar att öka osäkerheten ytterligare. Se vidare även i avsnitt 3.6.

I det första förslaget, daterat 5/11/2010, [19] används en zonindelning av arbetsområdet. Tänkesättet med zonindelning är inte nytt utan förekommer sedan tidigare i en EN-standard [22].

För arbetstagare föreslås följande:

Frekvensområde, f	Level 0 (V/m)	Level 1 (V/m)	Level 2 (V/m)	Exposure Limit value (V/m)
För exponering av bålén:				
25 - < 71 Hz	$250 \times 10^3 / f$	$250 \times 10^3 / f$	$2,12 \times 10^4$	1,4
50 Hz	5 000	5 000	21 200	1,4
För exponering av huvudet eller hela kroppen:				
25 - < 71 Hz	$250 \times 10^3 / f$	$250 \times 10^3 / f$	$2,12 \times 10^4$	$2 \times 10^{-3} \times f$
50 Hz	5 000	5 000	21 200	0,1

Tabell 10. E-fält. EU-förlag 5/11/2010 [19].

Frekvensområde, f	Level 0 (μT)	Level 1 (μT)	Level 2 (μT)	Exposure Limit value (V/m)
För exponering av bålén:				
25 - < 300 Hz	5000/f	1 000	$1,36 \times 10^6 / f$	1,4
50 Hz	100	1 000	27 200	1,4
För exponering av huvudet eller hela kroppen:				
25 - < 300 Hz	5000/f	1 000	$1,36 \times 10^3$	$2 \times 10^{-3} * f$
50 Hz	100	1 000	1 360	0,1

Tabell 11. B-fält. EU-förlag 5/11/2010 [19].

För zonindelning föreslås följande:

Exponering upp till Level 0 ingår i Zon 0

Exponering mellan Level 0 och upp till Level 1 ingår i Zon 1

Exponering mellan Level 1 och upp till Level 2 ingår i Zon 2

Level 0 motsvarar dagens EU-rekommendationer för allmänheten.

Level 1 motsvarar en nivå där det inte skall kunna ske någon skadlig och omedelbar påverkan på människan (speciella riskgrupper undantagna).

Level 2 motsvarar en nivå som alltid garanterar att Limit values underskrids.

Åtgärder:

Zon 0: Inga

Zon 1: Uppmärkning närmast källan för fältet. Uppmärkning som anger att personer i riskgrupper inte skall vistas i Zon 1. Arbetstagare som vistas i zonen skall vara informerade.

Zon 2: Uppmärkning. Begränsa eller kontrollera tillträde. Information till och utbildning av arbetstagare.

Vid arbete över Level 2 krävs att man kan visa att Exposure Limit value inte överskrids och att åtgärder vidtas för att minska exponeringen.

Det andra förslaget, daterat 02/03/2011 [20], innehåller som det tidigare även allmänna avsnitt som ändamål med direktivet och arbetsgivarens åligganden. Förslaget beaktar endast kända och omedelbara hälsoeffekter av inducerad elektriska fält, energiabsorption och kontaktströmmar. Det beaktar således inte långtidseffekter, inte direktkontakt med spänningsförande delar och inte indirekta effekter som störningar på medicinska inplantat.

Man definierar *Exposure limit values* som den högsta fältnivå som en arbetstagare kan exponeras för utan att det medför någon känd hälso-påverkan.

Orientation values eller *Action values* är mätbara storheter som enligt direktivet kräver någon form av åtgärd. En exponering för fält upp till och med denna nivå medför att *Exposure limit values* inte överskrids. Vid exponering upp till *Orientation values* finns i normalfallet (dvs ej riskgrupper) ingen risk för omedelbara hälsoeffekter. För särskilda riskgrupper finns *Nominal action values*, vilka motsvarar de exponeringsvärden som tidigare angetts för allmänheten.

Generellt gäller att exponering under nivån för *Orientation values* medför enkla åtgärder. I området mellan *Orientation values* och *Action values* krävs ytterligare åtgärder och vid exponering för fältstyrkor överstigande *Action values* krävs åtgärder för att visa att exponeringen inte överskrider *Exposure limit values*.

De föreslagna exponeringsnivåerna för det lägre frekvensområdet sammanfattas i Tabell 12 och Tabell 13.

Utöver dessa föreslås även begränsningar för kontaktströmmar, dvs de kortvariga urladdningsströmmar som kan uppkomma vid kontakt med ett uppladdat föremål. För frekvenser mellan 0 Hz och 2,5 kHz skall dessa strömmar begränsas till 1,0 mA.

Frequency (Hz)	Nominal action value for persons at particular risk (V/m)	Orientation value (V/m)	Action value (V/m)	Exposure Limit value (V/m)	
				Peripheral Nervous System	Central Nervous System
0	-	-	-	-	-
1 - <25	10^4	$2,12 \times 10^4$	$2,12 \times 10^4$	1,41	0,035
25 - <71	$250 \times 10^3 / f$	$500 \times 10^3 / f$	$2,12 \times 10^4$	1,41	$f/705$
50	5 000	10 000	21 200	1,41	0,071

Värden för Peripheral Nervous System (PNS) tillämpas när endast bålen eller lemmar exponeras. Värden för Central Nervous System (CNS) tillämpas när huvudet exponeras.

Tabell 12. E-fält. EU-förslag 02/03/2011 [20].

Arbetsgivaren eller motsvarande skall vidta följande åtgärder:

- Personer som tillhör särskilda riskgrupper skall inte exponeras över nivån för *Nominal action values for persons at particular risk*, såvida inte en riskanalys visar annat.

- För områden med exponering under *Orientation values* gäller att källan skall märkas ut såvida inte tillträde är omöjligt under normala former. Personer som arbetar inom zonen skall vara informerade.
- För områden med exponering mellan *Orientation values* och *Action values* gäller att de skall märkas upp och att tillträde skall förhindras eller kontrolleras. Personer som arbetar inom zonen skall vara informerade och tränade.
- För områden med exponering över *Action values* skall arbetsgivaren visa att Exposure limit values inte överskrids, vidta åtgärder för att minska exponeringen, vidta åtgärder för att förhindra eller kontrollera tillträdet samt informera och utbilda personalen.

Frequency (Hz)	Nominal action value for persons at particular risk (μT)	Orientation value (μT)	Action value (μT)		Exposure Limit value (V/m)	
			Peripheral Nervous System	Central Nervous System	Periph. Nervous System	Central Nervous System
Static	40 000	2×10^5 *)	2×10^6 *)	2×10^6 *)		**))
0 - < 1	40 000	$2 \times 10^5 / f^2$	1 358 000	34 000/f	1,4	0,035
1 - < 8	$40\,000 / f^2$	$2 \times 10^5 / f^2$	$1,36 \times 10^6 / f$	34 000/f	1,4	0,035
8 - < 25	5 000/f	$25 \times 1000 / f$	$1,36 \times 10^6 / f$	34 000/f	1,4	0,035
25 - < 300	5 000/f	1 000	$1,36 \times 10^6 / f$	$1,36 \times 10^3$	1,4	f/705
50	100	1 000	27 200	1 360	1,4	0,071

*) Medelvärde över kroppsdel och riktningar.

**) Ett högsta värde på 8 T rekommenderas.

Tabell 13. B-fält. EU-förslag 02/03/2011 [20].

Det tredje förslaget, EG-kommissionens förslag från juni 2011 [21], skiljer sig något från de två tidigare. I det följande ges en översikt av förslaget med tonvikt på det lägre frekvensområdet. Texten ges på svenska, "inofficiellt" och inte ordagrant översatt från den engelska texten.

Avsnitt I. Allmänna bestämmelser

Artikel 1. Syfte och tillämpningsområde

§ 2-3. Detta direktiv avser de risker som arbetstagare utsätts för på grund av kända, kortsiktiga, negativa effekter på kroppen. Det omfattar inte påstådda långsiktiga effekter.

Artikel 2. Definitioner

1. Kortsiktiga hälsoeffekter: Biologiska effekter som har en skadlig effekt på mentala eller fysiska förhållanden och/eller på välbefinnandet.
2. Kortsiktiga säkerhetseffekter: Effekter som ger upphov till tillfälligt obehag eller som påverkar uppfattningsförmågan eller andra hjärn- eller muskelfunktioner och som därmed kan påverka arbetstagarens möjligheter att utföra sitt arbete på ett säkert sätt.
3. Direkta effekter: Effekter på människan som direkt har sin orsak i starka elektriska eller magnetiska fält, t ex muskelstimulans, påverkan på nerver eller känselorgan, lokal uppvärmning, yrsel eller huvudvärk.
4. Indirekta effekter: Effekter på föremål som en följd av starka elektriska eller magnetiska fält, som i sin tur kan medföra hälsofara. Ex kontaktströmmar, starka magnetfälts påverkan på järnföremål och påverkan på medicinska implantat.
5. Gränsvärden för exponering: Gränser för exponering som är direkt grundade på bekräftad hälsopåverkan och biologiska hänsynstaganden. Om gränserna för hälsoeffekter respekteras, säkerställs att arbetstagare är skyddade mot alla kända hälsoeffekter. Om gränserna för säkerhetseffekter respekteras, säkerställs att arbetstagare är skyddade mot alla kända hälso- och säkerhetseffekter.
6. Orienteringsvärden för exponering: Mätbart värde som motsvarar en elektrisk fältstyrka eller magnetisk flödestäthet som inte skall kunna medföra någon kortsiktig hälsoeffekt vid normalt arbete eller hos en person tillhörande en särskild riskgrupp. Om dessa gränser respekteras säkerställs att arbetstagare är skyddade mot alla kända hälso- och säkerhetseffekter.
7. Insatsvärden för exponering: Mätbart värde som motsvarar en elektrisk fältstyrka eller magnetisk flödestäthet som säkerställer att motsvarande gränsvärde garanteras. Exponering mellan orienteringsvärde och insatsvärde kräver mer omfattande utredning och åtgärder. Om insatsvärdet respekteras säkerställs att motsvarande gränsvärde för hälsoeffekter respekteras.

Artikel 3. Gränsvärde, orienteringsvärden och insatsvärden

§ 1. Vid exponering över insatsvärdet skall man visa att motsvarande gränsvärde för hälsoeffekter inte överskrids. Vid exponering över orienteringsvärdet skall man visa att motsvarande gränsvärde för hälso- och säkerhetseffekter inte överskrids eller att exponering ligger under motsvarande insatsvärde.

§ 4-5. För personal som arbetar med magnetiska resonanssystem (MRI) eller i vissa fall inom försvaret, gäller särskilda regler.

§ 6. Arbetstagare får inte exponeras över aktuellt gränsvärde för hälsoeffekter. För de specialfall då dessa gränsvärden kan komma att tillfälligt överskridas kan medlemsländerna utfärda ett särskilt kontrollsystem. Sådana specifika situationer skall anmälas till EU-kommisionen.

Avsnitt II. Arbetsgivarens skyldigheter**Artikel 4. Fastställande av exponering och bedömning av risker**

§ 1. Arbetsgivaren skall bedöma och om nödvändigt, mäta och/eller beräkna nivåerna på de elektromagnetiska fält som arbetstagarna exponeras för. Detta skall ske enligt de anvisningar som ges i direktivets bilaga eller enligt standarder från CENELEC eller i andra standarder eller riktlinjer om så krävs.

§ 2. Om bedömning enl avsnitt 1 visar att insatsvärdet överskrids, skall arbetsgivaren bedöma, och om nödvändigt, beräkna om motsvarande gränsvärde för hälsopåverkan överskrids.

§ 4. Den bedömning, mätning och/eller beräkning som avses ovan skall planläggas och genomföras av behöriga instanser och med lämpliga intervall.

§ 6. Arbetsgivaren skall inneha en riskbedömning och skall fastställa vilka åtgärder som skall vidtas i enlighet med Artikel 5 och 6 i detta direktiv.

Artikel 5. Bestämmelser som syftar till att undvika eller minska riskerna

§ 2. Om insatsvärden överskrids skall arbetsgivaren utarbeta och genomföra en handlingsplan som skall innehålla tekniska och/eller organisatoriska åtgärder som syftar till att förebygga exponering över gränsvärdet. Detta gäller ej om riskbedömningen visat att gränsvärdet inte överskrids.

§ 3. De arbetsplatser där arbetstagare kan komma att exponeras för fält överstigande orienterings- eller insatsvärdet, skall markeras med lämpliga skyltar och tillträdet till dem begränsas på lämpligt sätt.

§ 4. Arbetstagare får under inga omständigheter utsättas för exponeringar som överstiger gränsvärdet för hälsopåverkan. Om detta sker trots de åtgärder som arbetsgivaren vidtagit för att följa detta direktiv, skall arbetsgivaren vidta omedelbara åtgärder för att sänka exponeringen till en nivå som understiger gränsvärdet. Arbetsgivaren skall fastställa orsakerna till att gränsvärdet för hälsopåverkan överskridits och ändra de skyddande och förebyggande åtgärderna för att undvika att detta upprepas.

Artikel 6. Information och utbildning för arbetstagarna

Arbetsgivaren skall säkerställa att de arbetstagare som exponeras för risker på grund av elektromagnetiska fält på arbetsplatsen, får all nödvändig information och utbildning om resultatet av den riskbedömning som utförts. Informationen kan också delges arbetstagarnas representanter.

Artikel 7. Samråd med och medverkan av arbetstagare

Samråd med och medverkan av arbetstagare och/eller deras representanter skall genomföras beträffande de frågor som omfattas av direktivet.

Avsnitt III Övriga bestämmelser

Artikel 8. Hälsokontroll

§ 1. I syfte att förebygga och tidigt diagnostisera eventuella negativa hälsoeffekter skall lämpliga hälsokontroller genomföras.

Vid exponering för frekvenser upp till 100 kHz skall varje oönskad eller oväntad effekt rapporteras av arbetstagaren och meddelas ansvarig för hälsoundersökningen för vidare åtgärder.

§ 2. Arbetsgivaren skall tillse att läkaren eller den ansvarige har tillgång till den genomförda riskbedömningen.

Artikel 14. Införlivande

Medlemsstaterna skall senast den 30 april 2014 sätta i kraft de bestämmelser i lagar och författningar som är nödvändiga för att följa detta direktiv.

Annex II

B. Exponeringsnivåer och gränser för exponering

Insatsvärden och Orienteringsvärden motsvarar uppmätt eller beräknat fält utan närvaro av någon människa.

Gränsvärden för hälsopåverkan och för säkerhetseffekter uttrycks som en elektrisk fältstyrka (V/m) inne i kroppens nervsystem.

För personer som tillhör en särskild riskgrupp, d v s bär medicinska inplantat eller är gravida, skall en individuell riskanalys göras.

Not 1. En noggrann verifiering skall göras för varje situation när insatsvärdet överskrids.

Not 2. Om vågformen avviker märkbart från sinusformen skall toppvärdet användas enligt följande:

För gränsvärden skall toppvärdet jämföras med det inducerade fältets toppvärde, d v s det tabellerade värdet x 1,41. För magnetisk flödestäthet och elektrisk fältstyrka utanför kroppen, skall toppvärdet av deras ändringshastighet jämföras med motsvarande tabellerade värde multiplicerat med 8,9 x f.

Gränsvärdet för säkerhetseffekter har bestämts utifrån gränsen för påverkan på det centrala nervsystemet (CNS).

Gränsvärdet för hälsoeffekter har bestämts utifrån gränsen för påverkan på det perifera nervsystemet (PNS) och för stimulans av nervfibrer i det centrala nervsystemet.

Den kontinuerliga kontaktströmmen begränsas till 1 mA för frekvensområdet 0 - 2500 Hz.

Frekvens (Hz)	Gränsvärde (V/m)	
	För säkerhetseffekter	För hälsoeffekter
1 - 10	$0,5 / f$	0,8
10 - 25	0,05	0,8
25 - 400	$0,002 \times f$	0,8
400 - 3000	0,8	0,8
50	0,1	0,8

Tabell 14. EU juni 2011. Gränsvärden (Table 2.1) [21].

Frekvens (Hz)	Orienteringsvärde (V/m)	Insatsvärde (V/m)
1 - 25	20×10^3	20×10^3
25 - 90	$500 \times 10^3 / f$	20×10^3
90 - 3000	$500 \times 10^3 / f$	$1800 \times 10^3 / f$
50	10 000	20 000

Not 1. Insatsvärdet för elektrisk fältstyrka, 1–90 Hz, är begränsat till 20 kV/m för att begränsa risken för indirekta effekter som gnisturladdningar. Om risken för gnisturladdningar har hanterats på annat sätt, genom tekniska åtgärder och utbildning, kan exponering över insatsvärdet accepteras. Gränsvärdet får ej överskridas.

Tabell 15. EU juni 2011. Orienterings- och insatsv. E-fält. (Table 2.2) [21].

Frekvens (Hz)	Orienteringsvärde (μT)	Insatsvärde (μT)
0	2×10^6	8×10^6
>0 - 1	$(2-1,8 \times f) \times 10^6$	$(5,67-5 \times f) \times 10^6$
1 - 8	$2 \times 10^5 / f^2$	$0,666 \times 10^6 / f$
8 - 25	$25\,000 / f$	$0,666 \times 10^6 / f$
25 - 300	1000	$0,666 \times 10^6 / f$
300 - 3000	$3 \times 10^5 / f$	$0,666 \times 10^6 / f$
50	1000	13 320

Not 1. Värdet för 0 Hz är gränsvärde.

Tabell 16. EU juni 2011. Orienterings- och insatsv. B-fält. (Table 2.3) [21].

3.5 Översikt av riktlinjer för 50 Hz exponering

Storhet	ICNIRP 1998	ICNIRP 2010	EU 2004	EU Draft 5 nov 2010	EU Draft 2 mars 2011	EU Draft Juni 2011
Gränsvärde (Basic restriction)	10 mA/m ² Huvud och bål	0,1 V/m CNS vävnad i huvudet	10 mA/m ² Huvud och bål	0,1 V/m Huvudet eller hela kroppen	0,071 V/m CNS	0,1 V/m CNS vävnad i huvudet
Gränsvärde (Basic restriction)		0,8 V/m Övriga kroppen		1,4 V/m Endast bål	1,41 V/m PNS, bål och lemmar	0,8 V/m PNS och nervfibrer i CNS
Referensnivå E-fält (Reference level)	10 kV/m	10 kV/m	10 kV/m	5 kV/m Level 0-1, Zon 0-1 1.)	5 kV/m För riskgrupper 10 kV/m Orientation value. 1.)	10 kV/m Orientation value. 1.)
Referensnivå E-fält (Reference level)	20 kV/m 3.)			21,2 kV/m Level 2, Zon 2 2.)	21,2 kV/m Action value 2.)	20 kV/m Action value. 2.) 3.)
Referensnivå B-fält (Reference level)	500 µT	1 000 µT	500 µT	100 µT Level 0, Zon 0 1000 µT Level 1, Zon 1 1 360 µT Level 2, Zon 2 Huvudet eller hela kroppen 27 200 µT Level 2, Zon 2 Endast bål	100 µT För riskgrupper 1 000 µT Orientation value. 1.) 27 200 µT Action value. 2.)	1 000 µT Orientation value. 1.) 13 320 µT Action value. 2.)

- 1.) Ingen negativ hälsopåverkan vid normalt arbete
- 2.) Garanteras att gränsvärdet ej överskrids
- 3.) Högre värde kan accepteras om det ej föreligger risk för gnisturladdningar.

Tabell 17. Översikt av riktlinjer för 50 Hz exponering. Värden för ICNIRP 2010 och EU-draft juni 2011 markerade med fetstil.

3.6 Förslag från CEEMET IEG - januari 2012

En av de Europeiska organisationer som är engagerade i utarbetandet av ett nytt EMF-direktiv är CEEMET – "the Council of European Metal, Engineering and Technology-based Industries". CEEMET har låtit bilda en expertkommitté – IEG, Industry Expert Group - för granskning EU-kommissionens förslag från juni 2011. Den 26 januari 2012 publicerade kommittén ett förslag som på ett flertal punkter skiljer sig från kommissionens [23].

En skillnad är att angivna gränsvärden för "Safety effects" och för frekvenser 1 Hz – 100 kHz utgår och ersätts med en motsvarande uppsättning gränsvärden för "Sensory effects", men då bara för frekvenser 1 – 400 Hz. Högre frekvenser täcks in av gränsvärdet för "Health effects".

Kommissionens begrepp "Orientation value" har i IEGs förslag döpts om till "Lower Action value".

För det elektriska fältet och för frekvenser > 400 Hz föreslås storleken på "Lower Action value" ändras uppåt jämfört med "Orientation values".

Även för det magnetiska fältet föreslås en ändring av "Orientation values" till "Lower Action values". Nästföljande nivå – "Action values" – delas upp i exponering av "Head and trunk" och av "Limb". Tidigare "Orientation values" motsvarar i förslaget "Head and trunk" och för lemexponering finns en ny högre nivå som för 50 Hz är 54 000 μT , att jämföra med 13 320 μT vid exponering av huvud och bål.

Det kan tilläggas att CEEMET ser positivt på tankarna att senarelägga införandet av EU-direktivet med två år, fram till den 30 april 2014.

3.7 Referenser om dosimetri från ICNIRP Guidelines 2010

En viktig fråga vid exponeringssituationer med förhållandevis höga fält är relationen mellan yttre fält och de storheter som uppstår inne i kroppen. Detta blir särskilt viktigt i de fall som det yttre fältet överstiger Referensnivån eller Action value och en kontroll måste göras mot aktuellt gränsvärde.

I ICNIRP 2010 finns en hänvisning till beräkningar av bl a Dimbylow, Hirata, Stuchly och Bahr genomförda med modeller som är rimligt anatomiskt korrekta. Dessa beräkningar skiljer sig väsentligt från de äldre med betydligt enklare modeller, som låg till grund för ICNIRP 1998. Den högsta inducerade fältstyrkan för ett yttre 50 Hz magnetiskt fält uppges enligt dessa källor vara 23 - 49 mV/m per mT, beroende på fältets riktning och kroppsform. För ett yttre elektriskt fält anges motsvarande värden till 1,6 – 3,4 mV/m per kV/m.

I det följande avsnittet ges en kortare översikt av detta referensmaterial.

Den första 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 [24]. 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 både vertikalt, från sidan och bröst-rygg. För in situ fältstyrkan redovisas den 99:e 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 18 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 näthinna (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 19 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 högst 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 (Ryggmärg)	1,16	2,92	4,88	8,90	27,0	53,0
White matter (Vit hjärnsubstans)	0,781	2,02	6,13	10,1	31,4	82,5
Grey matter (Grå hjärnsubstans)	0,474	1,62	4,85	8,04	30,2	74,8
Retina (Näthinna)	0,314	0,552	0,582	6,69	13,5	15,1

Tabell 18. Inducerad fältstyrka i NAOMI vid 50 Hz. Återgiven från ref [24], Table 5. Homogent fält.

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 19. Elektrisk fältstyrka in situ uttryckt som 99:e percentil och vid ett yttre magnetiskt fält av 1 mT. Återgiven från ref [24], Table 6. Homogent fält.

Exponering för ett yttre elektriskt fält redovisas i Tabell 20. Modellerna är både jordade via fötterna (GRO) och isolerade från jord (ISO). Högst fältstyrka in situ, 3,42 mV/m vid 1 kV/m, fås med NORMAN med fötterna i kontakt med marken.

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 20. Elektrisk fältstyrka in situ uttryckt som 99:e percentil och vid ett yttre elektriskt fält av 1 kV/m. GRO = modell jordad via fötterna. ISO = isolerad modell. Återgiven från ref [24], Table 7. Homogent fält.

Den andra av de utvalda artiklarna publicerades i Health Physics 2007 och har Bahr, Bolz och Hennes som författare [25]. 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 resultat från andra forskare.

I Tabell 21 visas resultat från en beräkning med en 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)
$E_z = 5 \text{ kV/m}$	12,8 (Grey matter)
$E_z = 5 \text{ kV/m}$	8,1 (White matter)
$H_y = 80 \text{ A/m}$, $B = 100 \text{ } \mu\text{T}$	2,24 (Grey matter)
$H_y = 80 \text{ A/m}$, $B = 100 \text{ } \mu\text{T}$	2,38 (White matter)

Tabell 21. Beräknad elektrisk fältstyrka, maxvärde i respektive organ. Homogent fält. Jordad modell vid E-fält. Återgiven från ref [25].

Tabell 22 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 23. 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 22. Elektrisk fältstyrka vid 5 kV/m, 50 Hz. Homogent fält. Ojordad modell. Återgiven från ref [25].

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 23. Elektrisk fältstyrka vid $H = 80 \text{ A/m}$ ($B = 100 \text{ } \mu\text{T}$), 50 Hz. Homogent fält. Återgiven från ref [25].

I den tredje artikeln, av Akimasa Hirata m fl, publicerad i Radiation Protection Dosimetry 2009 [26], ges resultat från beräkningar med modeller motsvarande en japansk man och 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 huvud-fot 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 kan 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 Tabell 24 och Tabell 25 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 [24]. NORMAN. Värde för ryggmärgen, 99 th percentil
	2,56	1,78	Bahr [25]. Maxvärde för hjärnans grå substans.

Tabell 24. Översikt elektriskt fält och in situ fältstyrka.

Yttre fält	Fältstyrka in situ (mV/m)			Kommentar
Magnetiskt fält, 1 mT, 50 Hz, ho- mogent	Exponering bröst-rygg	Exponering sida-sida	Exponering vertikalt	
	30,7			Dimbylow [24]. NORMAN. Värde för hjärnan. 99 th percentil
		48,6		Dimbylow [24]. NORMAN. Värde för ryggmärgen. 99 th percentil
			25,1	Dimbylow [24]. NA-OMI. Värde för hjärnan. 99 th percentil
	23,8			Bahr [25]. Maxvärde för hjärnans vita substans.

Tabell 25. Översikt magnetiskt fält och in situ fältstyrka.

I den nya utgåvan av ICNIRP Guidelines [18] har man utgått från tröskelnivån för uppkomsten av skadefosfener och därför är exponeringsförhållandena vid huvudet av primärt intresse. För ryggmärgskanalen, däremot, kan man acceptera något högre värden.

Med dessa förutsättningar kan ICNIRP ange följande relationstal mellan det yttre fältet och den inre fältstyrkan:

Elektriskt fält vid 50 Hz, 1 kV/m motsvarar 1,7 – 2,6 mV/m inducerad fältstyrka i hjärnan, d v s 100 mV/m motsvarar upp till 38 kV/m. För det perifera nervsystemet anges motsvarande relation till 12-33 mV/m per kV/m, d v s 800 mV/m motsvarar upp till 24 kV/m. Se även Tabell 24.

Magnetiskt fält vid 50 Hz, 1 mT motsvarar 23 – 33 mV/m inducerad fältstyrka i hjärnan, d v s 100 mV/m motsvarar upp till 3 mT. Se även Tabell 25.

Dessa exponeringsnivåer gäller givetvis bara under strikt kontrollerade betingelser.

Vid exponering av övriga kroppsdelar, som händer, fötter och bål, kan man acceptera högre nivåer på det magnetiska fältet. Regelverken, ICNIRP och EUs förslag till direktiv, utgår i detta fall från den nedre gränsen för stimulans av det perifera nervsystemet, som är 4 – 6 V/m räknat som inre fältstyrka. Till den lägre nivån har lagts en säkerhetsmarginal på 5 och med detta fås ett gränsvärde för övriga kroppsdelar på 0,8 V/m.

Relationen mellan ett yttre magnetfält och den inre fältstyrkan är något annorlunda i huden och kroppsdelar som berörs av det perifera nervsystemet, jämfört med vad som har visats ovan för det centrala nervsystemet. ICNIRP åberopar ett spann på 20 – 60 mV/m per mT externt fält [18]. Räknat med en högsta inre fältstyrka (gränsvärde) på 0,8 V/m och 60 mV/m per mT, fås ett

högsta yttre magnetfält på 13,3 mT. Ett sådant värde har ingen direkt motsvarighet i ICNIRP Guidelines, men en motsvarande nivå, 13,32 mT, finns i EU kommissionens förslag från juni 2011. Det anges där som ett "Action value", som enligt EU förslaget definition är den högsta nivå för vilken motsvarande gränsvärde inte överskrids.

3.8 Strömtäthet och elektrisk fältstyrka – en jämförelse av två storheter

Övergången från strömtäthet till elektrisk fältstyrka kom att ta tid. Mer än 10 år har gått sedan fältstyrkan började diskuteras som en alternativ storhet och detta trots att det är primärt potentialdifferenser eller fältstyrkan som är styrande vid stimulans av nervceller.

Då strömtätheten är produkten av det elektriska fältet och av konduktiviteten, kommer också fokus att ändras från vävnader med högt elektriskt fält och hög ledningsförmåga till vävnader med högt fält men inte nödvändigtvis hög ledningsförmåga. Höga fältstyrkor fås på detta sätt i torsons bröst- och ryggvävnad, men då ledningsförmågan är låg, blir strömtätheten låg. Hög strömtäthet fås däremot i de stora blodkärlen och i blodrik muskelvävnad.

Övergången har medfört att de faktiska begränsningarna för det yttre fältet har ändrats något och de mest kritiska organen har ändrats. Följande omarbetade beräkningsresultat från Dimbylow [24] visar på dessa skillnader:

Organ	Storhet	Exponering för ett yttre magnetiskt fält, 50 Hz. Procent av resp. gränsvärde; 10 mA/m ² och 100 mV/m					
		NAOMI			NORMAN		
		Bröst-rygg	Sida-sida	Huvud-fot	Bröst-rygg	Sida-sida	Huvud-fot
Näthinnan	J E	27,1 6,6	48,9 13,5	27,9 6,9	28,7 7,1	55,0 14,6	38,3 10,2
Hjärnan	J E	29,8 25,7	28,1 31,4	18,5 25,1	35,6 30,7	33,2 33,0	24,9 22,1
Rygg-märagskanalen	J E	29,8 17,7	28,1 27,0	18,5 13,5	35,6 29,7	33,2 48,6	24,9 14,6

Tabell 26. Omarbetade resultat för magnetisk flödestäthet efter Dimbylow [24]. I ursprungsmaterialet är strömtätheten (J) medelvärdesbildad över 1 cm² och den elektriska fältstyrkan (E) uttrycks som den 99:de percentilen. Med fetstil visas begränsande vävnad.

Med strömtäthet begränsas exponeringen av näthinnan, medan ryggmärgs-kanalen blir begränsande med elektrisk fältstyrka. Den senare medger också ett något högre yttre fält. Tydligt är att förhållandena i näthinnan är ungefär desamma i NAOMI som i NORMAN, beroende på ungefär samma huvudform hos de två modellerna. Ryggmärgskanalen däremot, påverkas mer hos den

längre NORMAN. Generellt gäller att större strömbana ger upphov till större ström. Ett magnetfält riktat sida-sida eller bröst-rygg kommer av denna orsak att ge upphov till högre strömtäthet än ett fält riktat huvud-fot.

Organ	Storhet	Exponering för 10 kV/m yttre elektriskt fält, 50 Hz. Modell jordad via fötterna. Procent av resp. gränsvärde; 10 mA/m ² och 100 mV/m	
		NAOMI	NORMAN
		Vertikalt fält	Vertikalt fält
Näthinnan	J E	21,7 5,5	21,1 5,1
Hjärnan	J E	18,4 20,2	17,8 16,5
Ryggmärgs-kanalen	J E	18,4 29,2	17,8 34,2

Tabell 27. Omarbetade resultat för elektrisk fältstyrka efter Dimbylow [24]. I ursprungsmaterialet är strömtätheten (J) medelvärdesbildad över 1 cm² och den elektriska fältstyrkan (E) uttrycks som den 99:de percentilen. Med fetstil visas begränsande vävnad.

Även med ett elektriskt fält ändras situationen vid övergång från strömtäthet till fältstyrka; det är ryggmärgskanalen som blir begränsande om man ser till fältstyrkan. Likaså är skillnaden mellan modellerna påtaglig och beror även här framförallt på NORMANs större kropp.

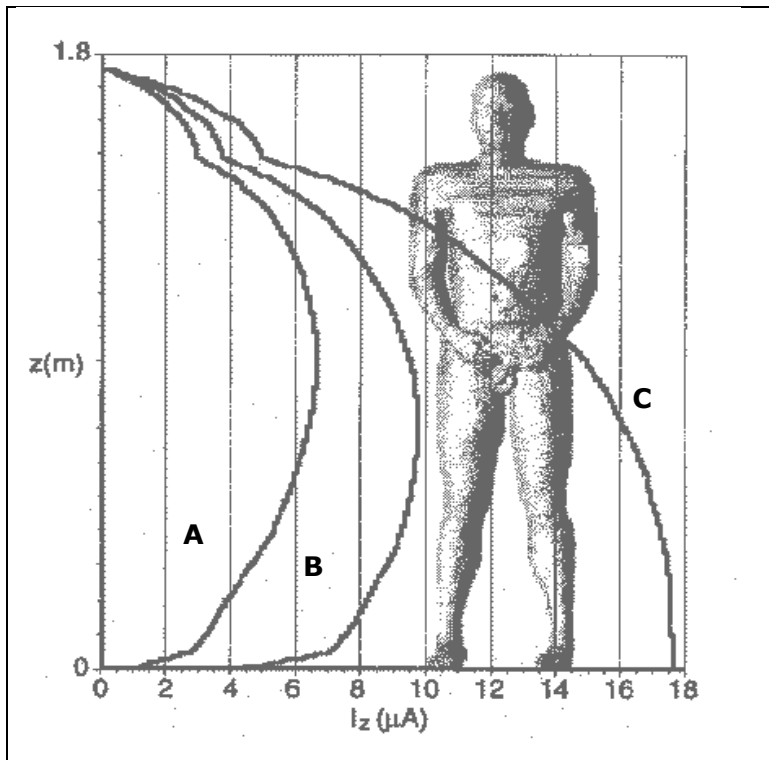
Beräkningar med varierad konduktivitet på vissa organ har visat att den inre fältstyrkan är en mer stabil storhet för ett yttre magnetiskt fält, den ändras högst måttligt med ändrad konduktivitet. För ett yttre elektriskt fält, däremot, är strömtätheten mer stabil, den styrs huvudsakligen av kroppsform och storlek och betydligt mindre av organens konduktivitet.

3.9 Jordad eller ojordad modell

Tabell 20 och Tabell 24 visar på betydelsen av modellens kontakt med jord vid ett yttre elektriskt fält. En modell jordad via fötterna får generellt högre strömtäthet och högre inre fältstyrka än en modell isolerad från jord. Detta framgår tydligt av Figur 2 som återges från en artikel av Dawson, Caputa och Stuchly [27]. Figuren visar resultatet av en beräkning med modellen UVic, som är snarlik med NORMAN vad det gäller anatomisk detaljeringsgrad. UVic består av drygt 1,7 miljoner beräkningselement med 3.6 mm:s sida, som bygger upp 33 olika organ med given konduktivitet.

En modell jordad via fötterna (kurva C) uppvisar en kontinuerligt ökande ström ner genom kroppen, med ett markant språng i nivå med axlarna. Strömmen genom den helt isolerade modellen (kurva A) når sitt maxvärde i

nivå med låren och sjunker sedan mot i stort sett noll i nivå med fotsulorna. Den mellanliggande kurva B gäller för en modell med skor på fötterna och där de 2 cm tjocka sulorna begränsar strömmen markant. Maxvärdet nås i nivå med låren.



Figur 2. Den totala vertikala strömmen till jord för modellen UVic vid 1 kV/m, 60 Hz. Återgiven efter [27]. Kurva A visar strömmen med modellen på oändligt avstånd ovan ett jordat plan. Kurva B visar strömmen med modellen stående ca 2 cm ovan ett jordat plan. Kurva C visar strömmen när modellens fotsulor har full kontakt med ett jordat plan.

Detta är givetvis intressant då vi i vart fall i arbetslivet har skor på fötterna och som innebär att vi är mer eller mindre isolerade från underlaget. Det senare kan bli aktuellt med skor med halvledande sula, där sulans resistans ligger i området 100 kΩ – 1000 MΩ och då kopplingen till jord blir mycket osäker. I praktiken får man därför räkna med att kurvorna B och C i Figur 2 utgör idealiserade ytterligheter.

Valet av skor, med isolerande eller med halvledande sula, kompliceras av att båda alternativen har för- och nackdelar. Den isolerande sulan ger lägre strömmar genom kroppen men medför kraftigare uppladdning av kroppen och därmed mer kännbara gnisturladdningar (se vidare i avsnitt 4.) Den halvledande sulan ger högre strömmar och mindre kännbara gnisturladdningar.

De nivåer på det yttre elektriska fältet som anges av ICNIRP och av EU förutsätter god kontakt mellan fötter och jord. Det finns därför en inte obetydlig säkerhetsmarginal inbyggd i deras rekommenderade exponerings-nivåer. Vid

vanligt arbete, med fötterna på marknivå, är det dock vanskligt att utnyttja denna marginal, men det kan vara en möjlighet vid arbete i högt elektriskt fält, från isolerande steg eller plattform.

3.10 Övrig litteratur till stöd vid en bedömning av en exponeringssituation

En mer omfattande genomgång av den litteratur som berör fältberäkning, exponeringsföresättningar, dosimetri och kroppens reaktioner på höga fält har genomförts inom ramen för tre tidigare Elforskprojekt och avrapporterats i fyra rapporter; Gnisturladdningar och kontaktströmmar [28] och de tidigare nämnda Arbete i höga fält – Luftledningar 70-400 kV [6], Arbete i höga fält – Ställverk 70-420 kV [7] och Magnetfält i kabelmiljö [8], samtliga fyra med Anette Larsson och Göran Olsson som författare. I denna rapport tas därför inte upp sådan litteratur som redan åberopats. Däremot har det tillkommit en del intressanta arbeten, bl a om arbete i kraftigt inhomogena elektriska fält, som väl motiverar en kortare redogörelse här i denna rapport.

Universitetet i Tammerfors har tillsammans med Fingrid och Fortum Finland tagit fram ett system för att mäta den ström som passerar det kritiska halstvärdsnittet när kroppen exponeras för ett elektriskt fält [29], [30]. Utrustningen består av en ledande hjälm med ett likaså ledande visir som går runt hela huvudet. Hela huvudet blir på detta sätt täckt med ett ledande "skal". Den ström som går från skalet och till jord kan mätas med en liten bärbar utrustning. Då det omslutande skalets yta är något större än huvudets, blir strömmen större, men för detta kan man enkelt korrigera. Tanken är att strömmen från skalet, omräknad till en motsvarande mindre ström från huvudet, måste passera halstvärdsnittet med dess omfattande nervbanor. Om halstvärdsnittet antas vara homogent och med konstant konduktivitet, kan den genomsnittliga strömtätheten beräknas. Emellertid är halspartiet synnerligen komplext uppbyggt och det har tidigare visats i en artikel [31] att en mer korrekt modell med nio olika vävnader resulterar i en i strömtäthet i den kritiska ryggmärgskanalen som är endast 10 % av den genomsnittliga för hela halstvärdsnittet. Ett medelvärde för hela halstvärdsnittet är med andra ord ett synnerligen konservativt mått.

Mätsystemet är även så uppbyggt att det är möjligt att mäta den totala ström som går från hela kroppen till jord.

Mätsystemet har använts vid ett antal undersökningar, dels i samband med normalt underhållsarbete i sju olika 400 kV ställverk, vid arbete i stolpar för 110, 220 och 400 kV samt i samband med skogsrojning under ledningar för 400 kV. Erfarenheten är både god och omfattande och utrustningen har visat sig vara användbar vid olika arbetsuppgifter. Nackdelen, då den relateras till dagens regelverk, är att den ger ett resultat i form av en ström eller strömtäthet och inte i form av en elektrisk fältstyrka, som efterfrågas idag.

I artiklarna presenteras både maxström från respektive arbetsmoment och beräknad medelström. Det finns för- och nackdelar med båda storheterna, men maxströmmen ger trots allt ett värde som bättre kan relateras till omedelbara kroppsliga effekter än vad medelströmmen kan anses göra.

Den högsta maxströmmen, 105,8 μA , uppmättes i samband med inspektion från stege av sekundäruttagen på en strömtransformator. Beräknad medelströmtäthet i hela halstvärnsnittet blev i detta fall 6,4 mA/m^2 . Tas hänsyn till den ojämna strömfördelningen i halstvärnsnittet, blir strömtätheten i ryggmärgskanalen endast ca 0,7 mA/m^2 . Den totala kontaktströmmen från hela kroppen till jord uppmättes till maximalt 0,4 mA. Det elektriska fältet uppmättes till 36,4 kV/m i medeltal under arbetsmomentet och maximalt till 47,0 kV/m . Trots att fältet vida översteg insatsvärdet på 10 kV/m , blev inte strömtätheten högre än 6,4 mA/m^2 och egentligen endast 10 % därav i kritisk vävnad. Även kontaktströmmen låg väl under ICNIRPs begränsning på 1 mA.

Något liknande mätningar beskrivs i ett par bidrag till en EMF-ELF konferens i Paris i mars 2011. I det första bidraget av Francois Deschamp m fl beskrivs mätningar i 225 och 400 kV ställverk [32]. Man har där mätt E-fält på tre olika höjder (0,8, 1,3 och 1,7 m) ovan mark och mätt den totala kontaktström som flyter mellan montör och jord. E-fältet var i allmänhet högre än 10 kV/m och med ett högsta värde på 28 kV/m invid en frånskiljare. I denna position uppmättes också den högsta totala kontaktströmmen på 0,5 mA. Genom kalibrering i ett vertikalt och tämligen homogent E-fält har man även räknat om uppmätt kontaktström till det ekvivalenta homogena fält som skulle ge samma kontaktström.

I den andra artikeln av C Doernemann [33] redovisas också mätningar av den totala kontaktströmmen mellan person och jord och motsvarande omräkningar till ett homogent E-fält. I det här fallet redovisas mätningar i olika positioner i en 400 kV stolpe för två kretsar. Den uppmätta totalströmmen varierade mellan 0,01 och 0,51 mA och det beräknade ekvivalenta homogena fältet till 0,7 – 28,6 kV/m .

Till samma EMF-ELF konferens i Paris kom även ett andra bidrag från Francois Deschamps [34], men med inriktning mot Arbete Med Spänning. Vid arbete med den så kallade barhandsmetoden kan montören skydda sig mot det höga E-fältet med en ledande dräkt, en heloverall sydd av ett tyg med inslag av ledande fibrer. Det har funnits en viss osäkerhet om hur väl dessa dräkter skyddar montören då ansiktet är oskärmat och dräkten kan bäras på mer eller mindre lämpligt sätt. I artikeln redovisas en serie laboratoriemätningar utförda med en docka iförd dräkt och placerad i en rad olika realistiska arbetspositioner i närheten av spänningsförande ledare. Mätningarna inleddes med ett referensfall då en docka utan dräkt placerades upprätt stående i ett homogent fält på 10 kV/m . Strömmen till jord kunde då uppmätas till 36,1 μA . Med dockan skyddad av en välsittande dräkt uppmättes motsvarande ström till 2,0 μA . Därefter placerades dockan i en rad olika realistiska arbetspositioner, på kort avstånd från en ledare spänningssatt med 245 kV fas-jord, dvs i ett mer eller mindre inhomogent E-fält. Strömmen till jord kunde i dessa fall uppmätas till 0,9 – 13,6 μA . Således betydligt lägre än vad som kunde uppmätas i referensfallet, med en oskyddad docka stående i ett vertikalt fält på 10 kV/m .

3.11 Betydelsen av ett elektriskt fält som ej är vertikalt

Vid de tidigare redovisade beräkningarna med ett yttre elektriskt fält har det genomgående förutsatts att fältet är homogent och vertikalt. Detta beror på

att det tyvärr inte finns några publicerade beräkningar med de allmänt accepterade modellerna NORMAN/NAOMI och UVic, annat än med homogena och vertikala fält. För flertalet exponeringssituationer är också det vertikala fältet användbart, det gäller framförallt stora områden på marknivå under luftledningar. De spänningsförande linorna befinner sig på stort avstånd och det är likaså långt till andra ledande föremål. I ställverksmiljö, däremot, är situationen annorlunda. Avståndet till spänning är kortare och fältbilden kompliceras av en mängd jordade stativ och apparatdelar.

Det kan på flera sätt visas att det är den vertikala E-fältkomponenten som har störst betydelse för strömmen genom människokroppen. I IEC-standarden 62226-3-1 [35] visas detta med en analytisk beräkning med en rotations-sfäroid med "mänskliga" proportioner som exponeras för ett yttre elektriskt fält. Kroppen är homogen, har konstant konduktivitet = $0,2 \text{ S/m}$, men då strömtätheten styrs mer av den yttre geometrin än av den inre strukturen, ger detta ändå en rimlig bild av betydelsen av fältets riktning. Vid 1 kV/m vertikalt fält fås en strömtäthet av $134 \mu\text{A/m}^2$ och med 1 kV/m horisontellt fält fås endast ca $6 \mu\text{A/m}^2$.

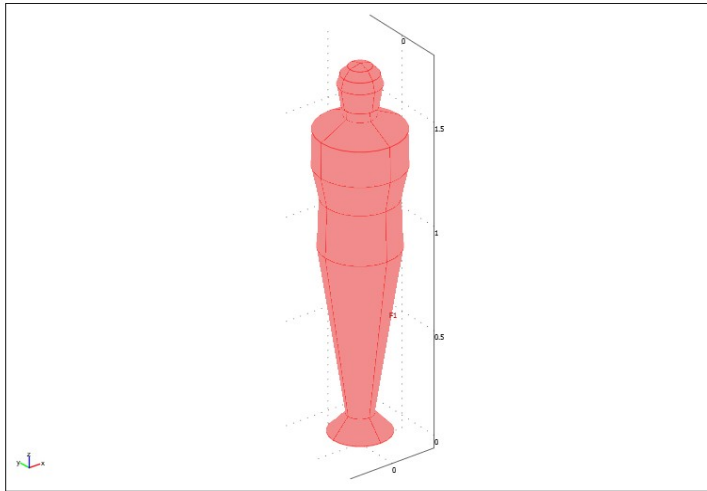
En annan möjlighet att visa på betydelsen av fältets riktning är att utnyttja numeriska beräkningar och den "Reference man" som beskrivs i den ovan nämnda IEC-standarden [35]. "Referensmannen" är en rotationssymmetrisk kropp med mänskliga proportioner; $1,76 \text{ m}$ lång och med vikten 73 kg (se Figur 3). Han har skapats vid en studie 1988 av 1774 män vid US Army. Det finns också en motsvarande "Reference women", något kortare och lättare, skapad vid en motsvarande studie av 2208 kvinnor. Båda modellerna är homogena, d v s saknar inre organ och har konstant konduktivitet.

En serie beräkningar med "Referensmannen" har utförts med ett sk finit elementprogram (COMSOL Multiphysics ver 3.3); med vertikalt och homogent fält, med ett vertikalt 3-fas fält och med ett 3-fas fält påverkat av en ledande pelare. Kroppens konduktivitet har satts till $0,2 \text{ S/m}$, motsvarande människokroppens medelkonduktivitet. Mer detaljer om dessa beräkningar redovisas i en tidigare elforskrapport [7]. Modellen visas i Figur 3.

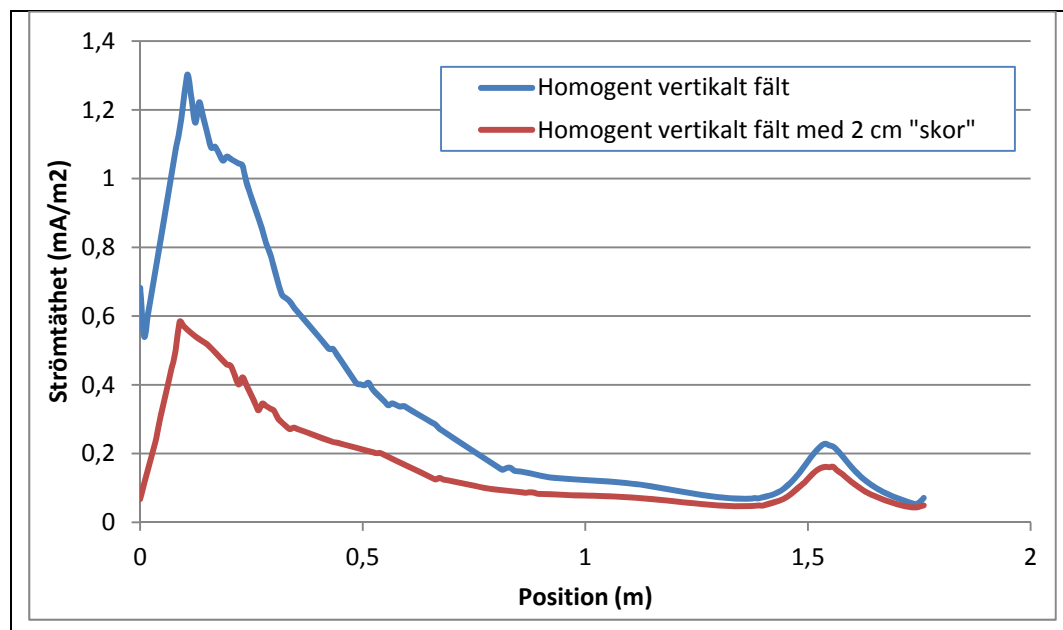
De första beräkningarna har genomförts med ett vertikalt och homogent fält. Detta har åstadkommits genom att placera kroppen mellan två cirkulära plattor med radien 10 m och 10 m från varandra. Med en spänning av 10 kV mellan plattorna fås ett nära nog homogent fält på 1 kV/m längs centrum-linjen mellan plattorna.

Beräkningsresultatet kan visas som en strömtäthet längs modellens centrumlinje; från fotsulorna (0 m) och upp till hjässan ($1,76 \text{ m}$). En sådan kurva uppvisar tydliga toppar i nivå med anklarna och halsen, d v s när tvärsnittsytan minskar påtagligt. Ankeltoppen blir betydligt mer påtaglig eftersom totalströmmen ökar ner genom kroppen. Strömtätheten i halsen är intressant då den ger en antydning om strömtätheten i den kritiska ryggmärgskanalen. Förvisso är det så att en stor del av strömmen genom sektionen passerar via de stora blodkärlen och via musklerna, men värdet kan ändå användas för att studera inverkan av olika åtgärder i fältmiljön. Figur 4 visar strömtätheten med modellens fotsulor i kontakt med jord och med ett 2 cm luftgap mellan fotsulor och jord. Skillnaden är påtaglig. Kurvan visande direktkontakt mot jord finns även i IEC-standarden och värdena är där mycket lika de som visas i Figur 4. Vid direktkontakt mot jord fås $0,23 \text{ mA/m}^2$ och med 2 cm luftgap

0,16 mA/m². Med 1 cm luftgap, vilket kan motsvara ett par vanliga skor, fås 0,18 mA/m².



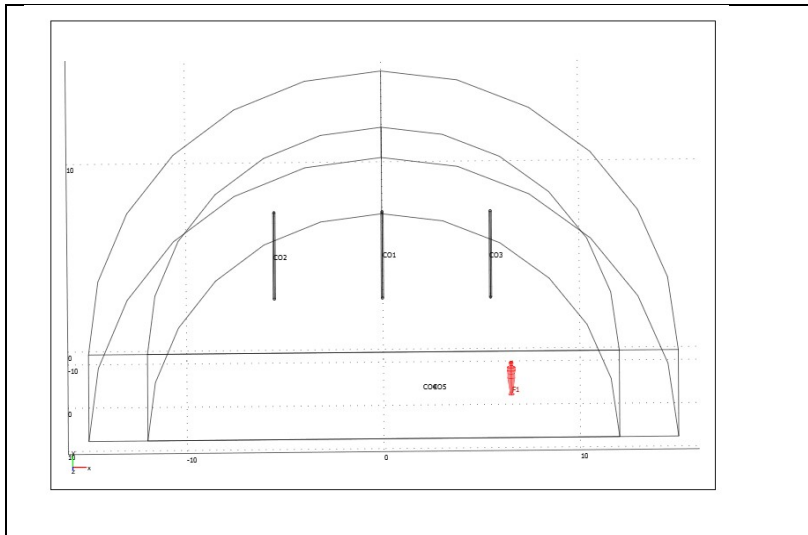
Figur 3. Den axialsymmetriska "Referensmannen" enligt IEC 62226-3-1 [35].



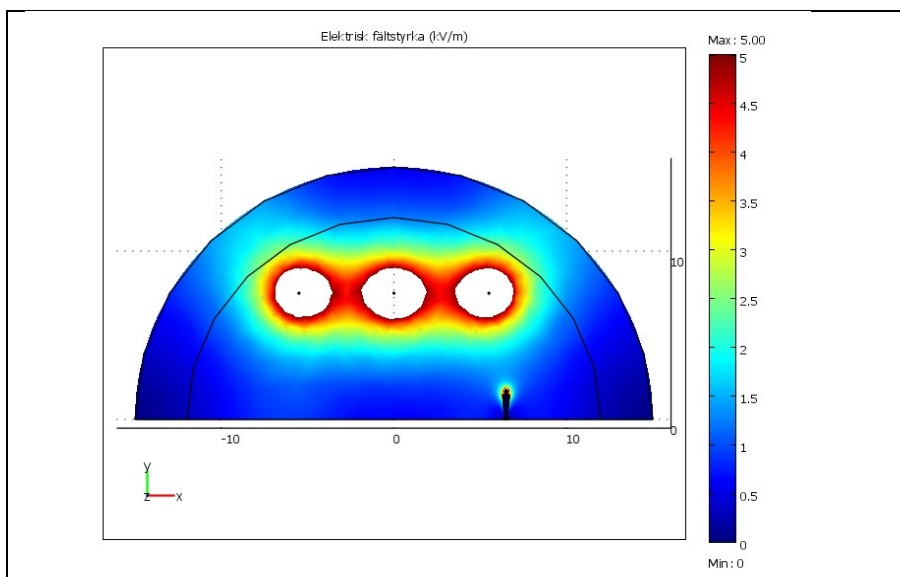
Figur 4. Strömtätheten längs modellens rotationsaxel. Jordad modell i ett homogent fält på 1 kV/m. Med och utan luftgap mellan fotsulor och jord.

I verkligheten är fälten mer eller mindre inhomogena och vanligen orsakade av 3-fas arrangemang. Figur 5 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 6.



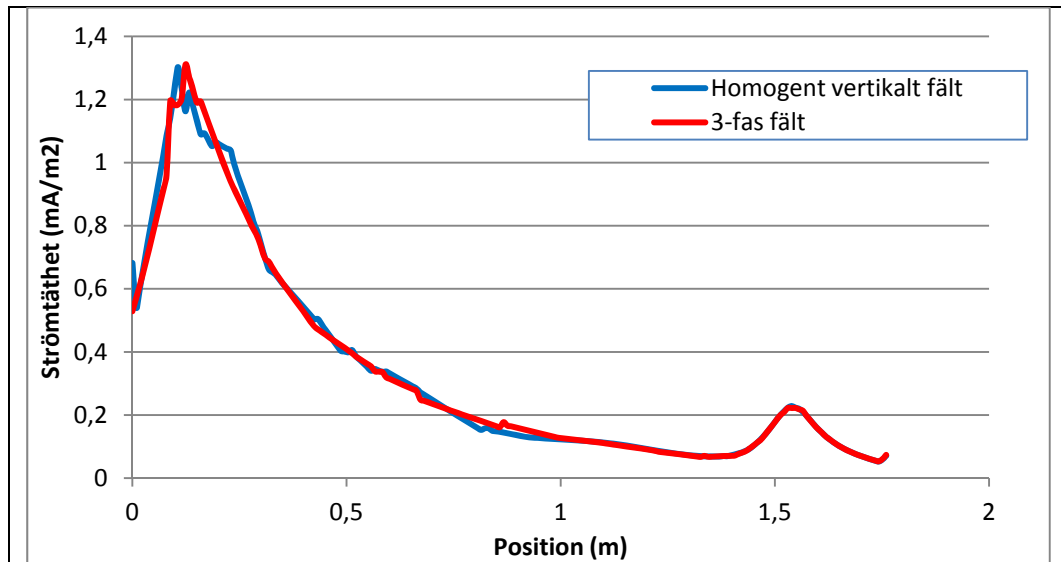
Figur 5. Beräkningsmodell med 3-fas fält.



Figur 6. 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.

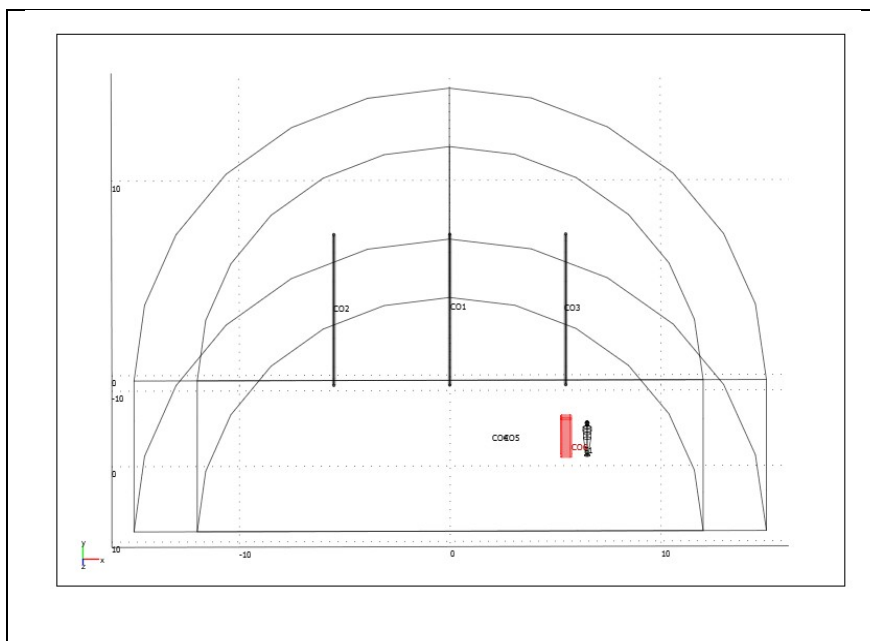
Figur 7 visar den beräknade strömtätheten för detta fall. Det visar sig att strömtätheten blir ungefär densamma som för ett homogent fält av samma storlek. För det kritiska halstvärnsnittet fås 0,23 mA/m² med homogent fält och 0,22 mA/m² med 3-fas fält. Orsaken till detta är att strömtätheten beror av

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.

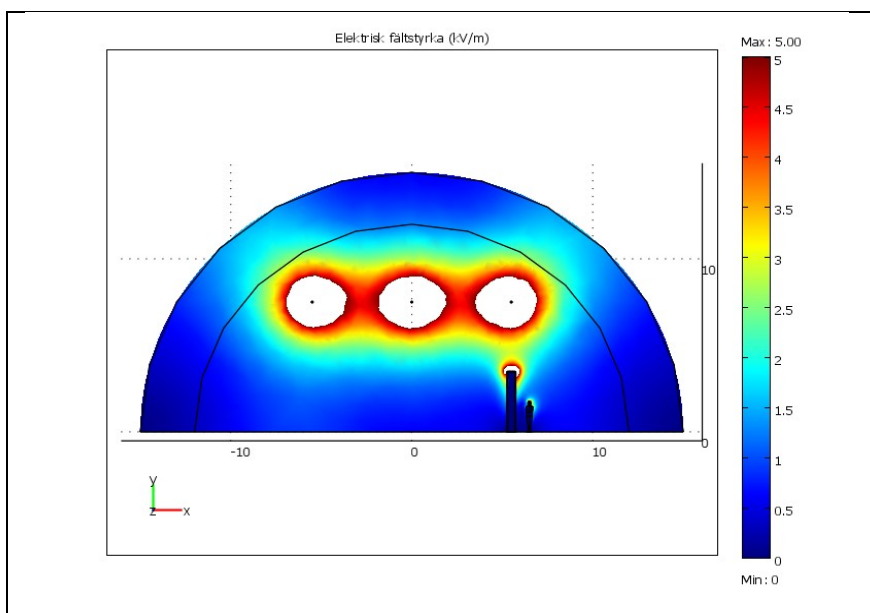


Figur 7. Strömtätheten längs den axialsymmetriska modellens rotationsaxel. Modellen placerad dels i ett 3-fas fält och dels i ett homogent vertikalt fält. I båda fallen är fötterna i direktkontakt med det jordade bottenplanet. Spänningen anpassad för att ge ett E-fält av 1 kV/m i en punkt 1 m utanför ytterfas och 1,5 m ovan mark.

För att studera inverkan av horisontella fältkomponenter kan beräkningsmodellen kompletteras med en jordad pelare. Figur 8 visar detta med en pelare placerad rakt under den ena ytterfasen. Pelaren är uppbyggd som en sluten kropp med tvärsnittet 0,5 x 0,5 m och höjden 2 m. Pelarens höjd har stor betydelse för resultatet vilket kan visas med en jämförande beräkning med en 3,5 m hög pelare. Figur 9 visar den motsvarande fältbilden i fallet med en 3,5 m hög pelare. Fältets storlek och riktning påverkas av pelaren som visas i Tabell 28.



Figur 8. Beräkningsmodell med 3-fasigt fält och en jordad pelare.

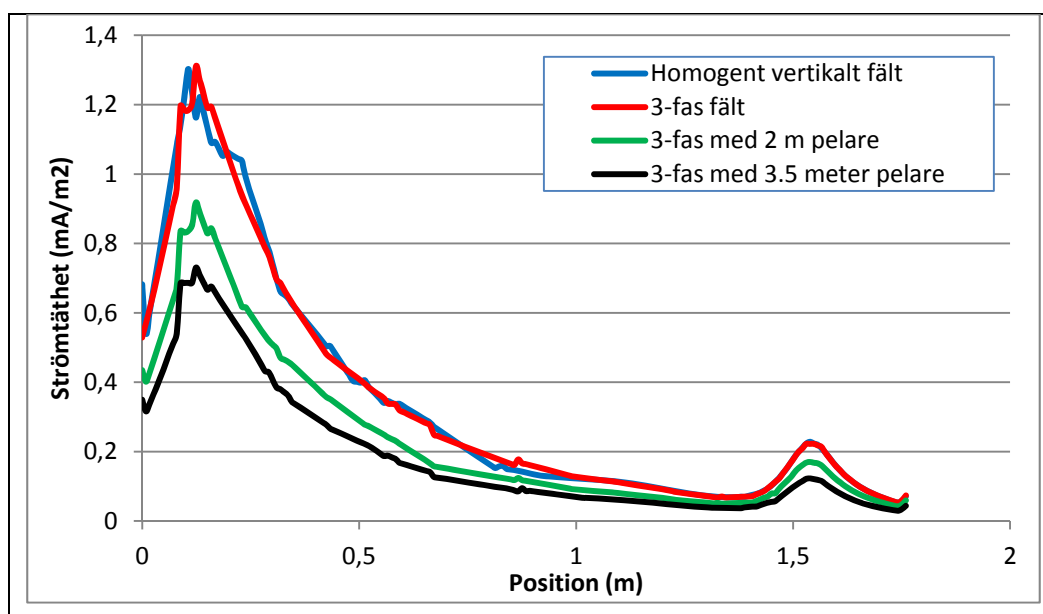


Figur 9. Elektrisk fältstyrka beräknad med en 3,5 m hög pelare. Spänningen anpassad för att ge ett E-fält av 1 kV/m i en punkt 1 m utanför ytterfas och 1,5 m ovan mark.

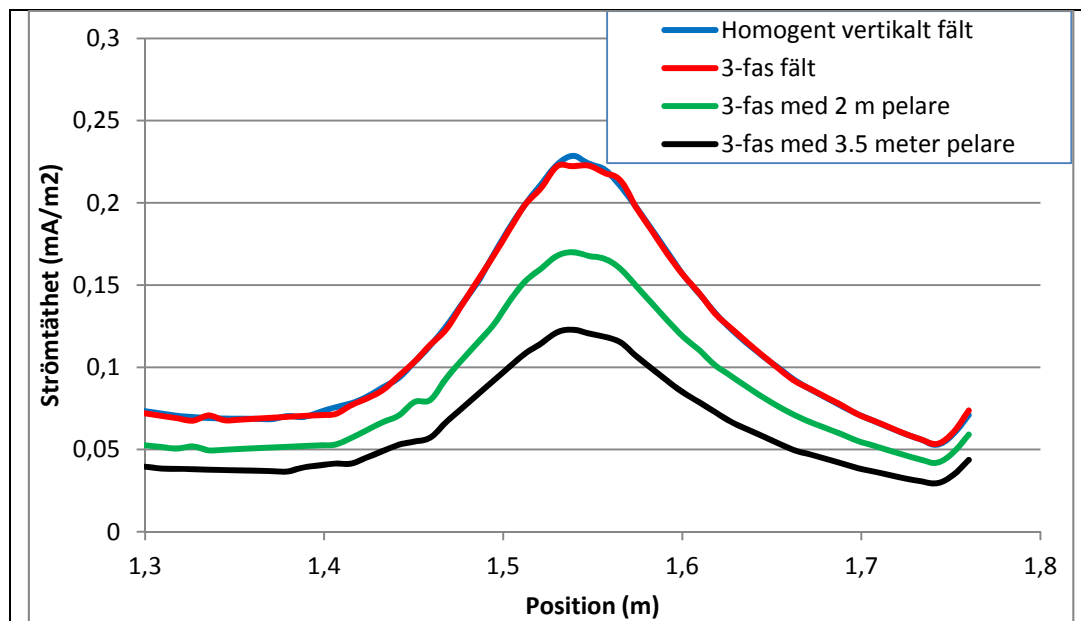
Figur 10 och Figur 11 visar strömtätheten i människomodellen under inverkan av en jordad pelare med höjden 2,0 respektive 3,5 m. Kurvorna för homogent och 3-fas fält visas som referens. Med pelare fås en betydande reduktion; 0,17 mA/m² med den lägre pelaren och 0,12 mA/m² med den högre.

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



Figur 10. Strömtätheten längs modellens rotationsaxel. Spänningen anpassad för att vid homogent vertikalt fält ge $E = 1,0$ kV/m i en punkt 1,5 m ovan jordplanet och 1,0 m utanför ytterfas.



Figur 11. Strömtätheten längs modellens rotationsaxel. Detalj av Figur 10 visande sektionen genom halstvårnsnittet, vid $H = 1,54$ m. $E = 1$ kV/m vid homogent fält.

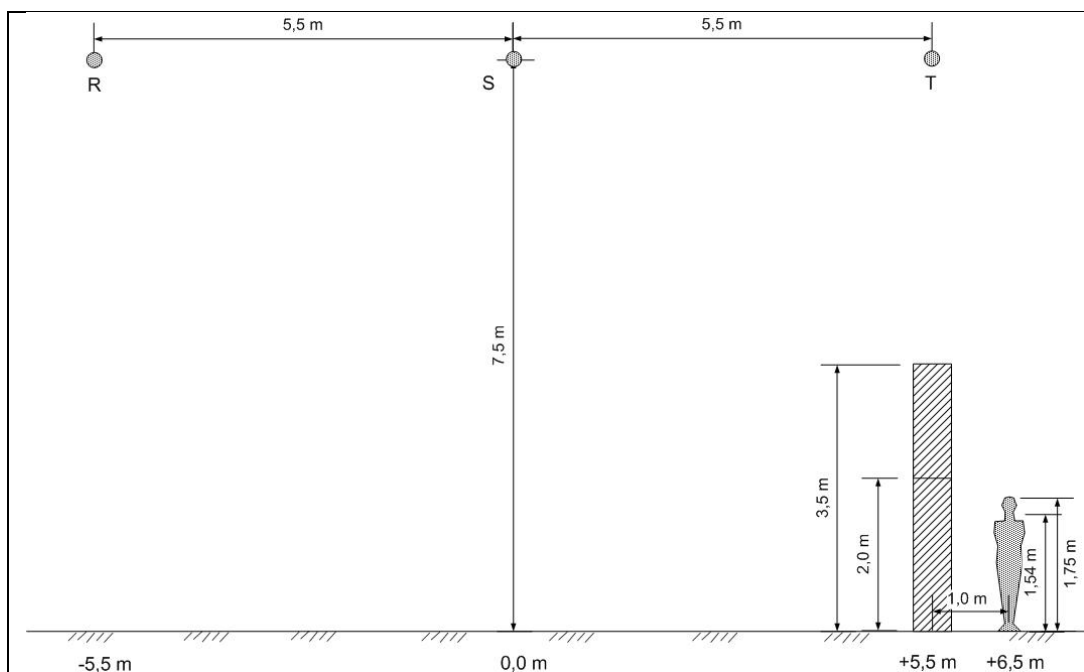
Inverkan av en ledande pelare kan lämpligen studeras i en miljö motsvarande ett fack i ett 420 kV ställverk, se Figur 12. I facket finns tre fasledare 7,5 m ovan mark och med 5,5 meters inbördes avstånd. I de två utgångsmodellerna **A0** och **B0**, med ostört fält, finns en människa i form av "Referensmannen", se även Figur 3, stående 0,5 m respektive 1,0 m utanför den ena ytterfasen. "Mannen" är homogen med konduktiviteten 0,2 S/m, vilket väl motsvarar människokroppens medelkonduktivitet.

Det elektriska fältet har beräknats i en punkt 1,75 m ovan mark och på "mannens" symmetrilinje. Strömtätheten har beräknats i halstvårnsnittet, i en punkt 1,54 m ovan mark och likaså på symmetrilinjen. Resultatet visas i Tabell 29. För modell **A0** och **B0** är det vertikala fältet ca 7,6 kV/m och den beräknade strömtätheten ca $1,6 \text{ mA/m}^2$, d v s ca $0,22 \text{ mA/m}^2$ per kV/m vertikalt fält.

Modell **A1** och **A2** har kompletterats med en 2,0 m hög kvadratisk pelare eller apparatstativ rakt under en ytterfas. "Referensmannen" står åter 0,5 respektive 1,0 m utanför ytterfasen. Vid det kortare avståndet står mannen omedelbart invid pelaren.

Det elektriska fältet och strömtätheten har beräknats i samma punkter som i utgångsmodellerna. Kort avstånd till pelaren medför ett hög horisontell fältstyrka och ett högt totalfält. Den vertikala fältkomponenten minskar däremot och det gör även den beräknade strömtätheten.

Tabell 29 visar att strömtätheten är till största delen beroende av den vertikala fältkomponentens storlek och inte av det totala fältet. Relationen mellan det vertikala fältet och strömtätheten varierar mellan 0,17 och 0,23 mA/m² per kV/m. Detta kan jämföras med det av Dimbylow [24] beräknade värdet på 0,178 mA/m² per kV/m gällande för ryggmärgskanalen och ett homogent vertikalt fält (se Tabell 27). I Tabell 29 finns även den inre fältstyrkan redovisad och beräknad enligt relationen $\mathbf{J} = \sigma \times \mathbf{E}$, där $\mathbf{J}$ = strömtätheten, σ = kroppens konduktivitet och $\mathbf{E}$ = den inre fältstyrkan. Även i detta fall har konduktiviteten satts till 0,2 S/m, motsvarande kroppens medelkonduktivitet. För både strömtätheten och den inre fältstyrkan gäller att de minskar påtagligt när "människan" skärmas av pelaren och det vertikala fältet minskar.



Figur 12. Modell motsvarande ett fack i ett 420 kV ställverk bestående av tre fasledare med c-c 5,5 m och 7,5 m ovan mark. En ledande pelare rakt under T-fasen med två olika höjder, 2,0 och 3,5 m. I figuren står en människa vid +6,5 m, d v s 1,0 m från pelaren centrum.

Detta långa resonemang om betydelsen av det elektriska fältets komponenter visar att de horisontella fältkomponenterna har begränsad inverkan på strömtätheten i denna förenklade "människa". Resonemanget kan givetvis inte med absolut säkerhet sägas gälla även för en riktig människa, med en annan konduktivitetsfördelning, men det är högst troligt att trenden är densamma.

Beräkningar med mer detaljerade modeller som NORMAN och UVic kräver ett omfattande arbete och publicerade resultat saknas ännu. Mätningar kan vara en annan möjlighet att uppnå säkerhet och den i avsnitt 3.10 beskrivna ledande hjälmen som använts av Universitetet i Tammerfors, Fingrid och Fortum Finland [29], [30] skulle då kunna vara ett lämpligt verktyg. I brist på

mer detaljerade beräkningar eller mätresultat kan man i dagsläget inte göra annat än att starkt rekommendera mätningar av det elektriska fältets komponenter och inte bara totalfältet.

	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, kV/m	E vertikalt, kV/m	E horisontellt, vinkelrätt mot ledarna, kV/m	Ström- täthet mA/m ²	E Fältstyrka inne i kroppen mV/m
		H = 1,75 m			Storhet beräknad vid H = 1,54 m	
A0	Utan pelare. Människa vid X=6,0 m	7,65	7,56	1,18	1,64	8,2
A2	3,5 m hög pelare. Människa vid X=6,0 m	9,84	2,04	9,63	0,46	2,3
B0	Utan pelare. Människa vid X=6,5 m	7,59	7,53	0,97	1,62	8,1
B1	2,0 m hög pelare. Människa vid X=6,5 m	8,39	7,34	4,06	1,24	6,2
B2	3,5 m hög pelare. Människa vid X=6,5 m	6,29	4,32	4,57	0,88	4,4

Tabell 29. 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.

3.12 Standarder

I kommissionens senaste förslag till EMF-direktiv [21] finns en skrivning om att mätning, beräkning och bedömning av fält skall ske enligt i första hand anvisningar i direktivets bilaga eller enligt standard från CENELEC eller annan internationell standard. Anvisningarna i bilagan är mycket kortfattade och ger begränsad vägledning. Dessvärre ger inte heller publicerade standarder det stöd som skulle kunna önskas. De som berör dosimetri, d v s relationen mellan ett yttre fält och en i kroppen inducerad storhet, skrevs på den tid då gränsvärdet var en strömtäthet och inte som idag en elektrisk fältstyrka. Detta betyder inte att materialet är oanvändbart, men det måste läsas och användas med extra omsorg. I det följande ges en översikt av publicerade standarder från CENELEC (EN-standard), från IEC och vad som hittills utgivits som

svensk standard (SS). Förteckningen var aktuell den 31 dec 2011, men det tillkommer ny standard kontinuerligt. Standard som bara berör högre frekvensområden har utelämnats i översikten.

Standardiseringsarbetet inom CENELEC och IEC bedrivs i tekniska kommittéer. Inom CENELEC finns kommittén 106X som behandlar olika frågor relaterade till människors exponering för fält inom området 0 – 300 GHz. Motsvarande kommitté inom IEC heter 106 och ansvarar för samma breda frekvensområde. Vissa, mer produktspecifika standarder, har dock tagits fram av andra kommittéer. Frågor som berör gränsvärdessättning och liknande ligger utanför kommittéernas arbetsområde.

CENELEC R014-001:1999. Guide for the evaluation of electromagnetic fields around power transformers. (Framtagen av CENELEC TC 14)

Tidigt utgiven rapport som beskriver ett par enkla metoder för beräkning av magnetiskt fält från ledarkombinationer (3-fas) och elektriskt fält från ledare ovan ett jordat plan.

CLC/TR 50442:2005. Guidelines for product committees on the preparation of standards related to human exposure from electromagnetic fields

Ger en beskrivning av olika typer av EMF-standarder och hur dessa skall tas fram.

EN 50413:2008. Basic standard on measurement and calculation procedures for human exposure to electric, magnetic and electromagnetic fields (0 Hz - 300 GHz)

SS-EN 50413:2009. Standard för mätning och beräkning av exponering för elektriska, magnetiska och elektromagnetiska fält (0 Hz - 300 GHz)

Grundläggande standard med definitioner och allmänt om beräkning av inducerade storheter. I Annex även mer detaljerat om analytisk beräkning av strömtäthet i rotationssymmetriska kroppar (sfäroider).

EN 50499:2008. Procedure for the assessment of the exposure of workers to electromagnetic fields

SS-EN 50499:2009. Tillvägagångssätt för bedömning av arbetstagares exponering för elektromagnetiska fält

Ger en mer allmänt hållen beskrivning av hur en bedömning av en arbetsplats kan utföras. Visad procedur kommer att behöva anpassas till ny utgåva av ICNIRP Guidelines och till nytt EU-direktiv.

EN 50527-1:2010. Procedure for the assessment of the exposure to electromagnetic fields of workers bearing active implantable medical devices - Part 1: General

SS-EN 50527:2010. Bedömning av exponering av arbetstagare med aktiva implanterbara medicintekniska produkter för elektriska och magnetiska fält - Del 1: Allmänt

Inledande om riskbedömning med implantat. Även en tabell som listar olika miljöer vad dessa kan medföra för bärare av implantat. Möjligen problem med elektriska fält <5 kV/m.

EN 50527-2-1:2011. Procedure for the assessment of the exposure to electromagnetic fields of workers bearing active implantable medical devices - Part 2-1: Specific assessment for workers with cardiac pacemakers

IEC/TS 60479-1 Edition 4 (2005-07-13). Effects of current on human beings and livestock - Part 1: General aspects

IEC/TS 60479-2 Edition 3 (2007-05-23). Effects of current on human beings and livestock - Part 2: Special aspects

IEC/TS 60479-3 Edition 1 (1998-09-11). Effects of current on human beings and livestock - Part 3: Effects of currents passing through the body of livestock

IEC/TR 60479-4 Edition 1 (2004-07-14). Effects of current on human beings and livestock - Part 4: Effects of lightning strokes on human beings and livestock

IEC/TR 60479-5 Edition 1 (2007-11-07). Effects of current on human beings and livestock - Part 5: Touch voltage threshold values for physiological effects

IEC 61786:1998. Measurement of low-frequency magnetic and electric fields with regard to exposure of human beings – Special requirements for instruments and guidance for measurements. (Framtagen av IEC TC 85)

Tidig men innehållsrik standard för mätning av elektriska och magnetiska fält och för kalibrering av sådana instrument.

IEC 61201 TS Edition 2 (2007-08-30). Use of conventional touch voltage limits - Application guide. (Framtagen av IEC TC 64)

Denna specifikation behandlar endast 50/60 Hz spänning och ren likspänning, ej högre frekvenser. Bör läsas tillsammans med IEC 60479.

IEC 62110 Edition 1.0 (2009-08-31). Electric and magnetic field levels generated by AC power systems - Measurement procedures with regard to public exposure

EN 62110:2009. Electric and magnetic field levels generated by AC power systems - Measurement procedures with regard to public exposure

SS-EN 62110:2010. Elektriska och magnetiska fält från växelströmsnät - Mätning med avseende på allmänhetens exponering

Utförligt om mätning och beräkning av elektriska och magnetiska fält under luftledningarna och över jordkablar. Beräkningsdelen innehåller även ett flertal exempel som visar beroendet av ledningens geometri.

IEC 62226-1 Edition 1.0 (2004-11-10). Exposure to electric or magnetic fields in the low and intermediate frequency range - Methods for calculating the current density and internal electric field induced in the human body - Part 1: General

EN 62226-1:2005. Exposure to electric or magnetic fields in the low and intermediate frequency range - Methods for calculating the current density and internal electric field induced in the human body - Part 1: General

SS-EN 62226-1:2005. Exponering för elektriska eller magnetiska fält inom det låga och intermediära frekvensområdet - Beräkning av strömtäthet och inre elektriska fält inducerade i människokroppen - Del 1: Allmänt

Inledande standard till serien om beräkning av inducerad ström och inre fältstyrka. Innehåller huvudsakligen definitioner.

IEC 62226-2-1 Edition 1.0 (2004-11-23). Exposure to electric or magnetic fields in the low and intermediate frequency range - Methods for calculating the current density and internal electric field induced in the human body - Part 2-1: Exposure to magnetic fields - 2D models

EN 62226-2-1:2005. Exposure to electric or magnetic fields in the low and intermediate frequency range - Methods for calculating the current density and internal electric field induced in the human body - Part 2-1: Exposure to magnetic fields - 2D models

SS-EN 62226-2-1:2005. Exponering för elektriska eller magnetiska fält inom det låga och intermediära frekvensområdet - Beräkning av strömtäthet och inre elektriska fält inducerade i människokroppen - Del 2-1: Exponering för magnetiska fält - 2D-modeller

Ger ett flertal exempel på hur inducerade strömmar kan beräknas i enkla 2-dimensionella kroppar, hur strömtätheten beror av geometri och materialets konduktivitet. Även om den beräknade storheten alltid uttrycks som en strömtäthet, är materialet väl användbart även för en den inre fältstyrkan.

IEC 62226-3-1 Edition 1.0 (2007-05-23). Exposure to electric or magnetic fields in the low and intermediate frequency range - Methods for calculating the current density and internal electric field induced in the human body - Part 3-1: Exposure to electric fields - Analytical and 2D numerical models

EN 62226-3-1:2007. Exposure to electric or magnetic fields in the low and intermediate frequency range - Methods for calculating the current density and internal electric field induced in the human body - Part 3-1: Exposure to electric fields - Analytical and 2D numerical models

SS-EN 62226-3-1:2007. Exponering för elektriska eller magnetiska fält inom det låga och intermediära frekvensområdet - Beräkning av strömtäthet och

inre elektriska fält inducerade i människokroppen - Del 3-1: Exponering för elektriska fält - Analytiska modeller och numeriska 2D-modeller

Utförligt om beräkning av strömtäthet orsakad av ett yttre elektriskt fält. Både analytiska och numeriska metoder beskrivs med exempel och det visas att de båda kan ge ungefär samma resultat. Det ges bl a ett kombinerat analytiskt och numeriskt exempel med en "Reference man" och en "Reference woman", som visar att strömtätheten i det kritiska halstvärnsnittet uppgår till 41 respektive 35 mA/m² vid ett yttre fält av 10 kV/m. Stora delar av materialet är användbart även vid beräkning av inre fältstyrka.

IEC 62233 Edition 1.0 (2005-10-19). Measurement methods for electromagnetic fields of household appliances and similar apparatus with regard to human exposure

EN 62233:2008. Measurement methods for electromagnetic fields of household appliances and similar apparatus with regard to human exposure

Både allmän metodik för bedömning och särskilda anvisningar för mätning av fält runt olika typer av hushållsapparater, som rakapparater, brödrostar och spisar.

IEC/TR 62271-208 (2009-10). High-voltage switchgear and controlgear – Part 208: Methods to quantify the steady state, power-frequency electromagnetic fields generated by HV switchgear assemblies and HV/LV prefabricated substations. (Framtagen av IEC TC 17)

En IEC Teknisk rapport för mätning av fält runt ställverksskåp och transformatorbunkrar för spänningar upp till 52 kV. Rapporten omfattar mätningar i laboratoriemiljö.

IEC 62311 Edition 1.0 (2007-08-14). Assessment of electronic and electrical equipment related to human exposure restrictions for electromagnetic fields (0 Hz - 300 GHz)

EN 62311:2008. Assessment of electronic and electrical equipment related to human exposure restrictions for electromagnetic fields (0 Hz - 300 GHz)

SS-EN 62311:2008. Bestämning av elektroniska och elektriska apparaters överensstämmelse med begränsningar avseende exponering för elektromagnetiska fält (0 Hz - 300 GHz)

Standard för bedömning av sådana produkter som inte omfattas av annan särskild standard. Standarden täcker hela frekvensområdet upp till 300 GHz och mycket av innehållet berör närfält och högre frekvenser.

Utöver dessa standarder finns några guider utgivna av Cigré. Det är givetvis inga standarder i formell mening men kan ändå ses som en form av internationell rekommendation.

Cigré Guide No 278 August 2005. The influence of line configuration on environment impacts of electrical origin.

Ger en fyllig beskrivning av det elektriska och magnetiska fältet under 400 kV luftledningarna och beroende av fasavstånd, höjd ovan mark etc. Beskriv även radiostörningar och ljud.

Cigré Guide No 320 April 2007. Characterisation of ELF magnetic fields.

Definitioner och fundamental om fältberäkning med hänsyn till geometri och fasläge. Ett avsnitt om olika typer av medelvärdesbildning av belastningsströmmar.

Cigré Guide No 373 February 2009. Mitigation techniques of power-frequency magnetic fields originated from electric power systems.

Om beräkning av magnetfält från olika ledarkonfigurationer samt en genomgång av olika metoder för kompensering och ett utförligt avsnitt om skärmning av magnetfält. Såväl luftledningar som kabelinstallationer beskrivs.

Cigré Guide No 375 April 2009. Technical guide for measurement of low frequency electric and magnetic fields near overhead power lines

Utförligt om mätning av elektriska och magnetiska fält under luftledningarna, med avsnitt bl a om luftfuktighetens betydelse och hur stativet för mätproben kan inverka på det uppmätta elektriska fältet.

4 Gnisturladdningar och kontaktströmmar

Gnisturladdningar och kontaktströmmar har tidigare behandlats i en Elforsk-rapport med Anette Larsson och Göran Olsson som författare [28]. Merparten av detta avsnitt har hämtats från denna rapport och för en mer fullständig beskrivning av dessa fenomen hänvisas därför till denna rapport [28].

En kropp i ett elektriskt fält får en laddningsfördelning på ytan. Fördelningen är beroende av fältets storlek och kroppens storlek, form och placering i fältet. Hos en människa som står upprätt i ett vertikalt elektriskt växelfält, ger laddningsfördelningen upphov till en ström som flyter mellan hjässan och fötterna. Vanligen bär vi människor skor på fötterna och strömmen kan då gå t ex via händerna till jord. För denna kontinuerliga ström – den s k kontaktströmmen – finns en begränsning på 1,0 mA vid 50 Hz för arbetstagare. Vid uppladdning av större föremål än en människa, som t ex en bil, kan kontaktströmmen nå betydligt större belopp.

Om människan enligt ovan, eller bilen, är isolerad från jord kommer det att ske en uppladdning likt vad som sker med en kondensator. Denna uppladdning kan resultera i spänningar på ett antal kV. Om den uppladdade kommer tillräckligt nära jord sker en kortvarig urladdning – en gnisturladdning. En sådan urladdning kan upplevas som besvärande och i de mer extrema fallen, med stora uppladdade föremål, kan urladdningen bli smärtsam.

Gnisturladdningen sker således innan kontakt har skett och kontaktströmmen flyter först när kontakt har uppnåtts.

I den vidare framställningen beskrivs fyra huvudfall:

- Kontaktström från en uppladdad människa till jord.
- Gnisturladdning från en uppladdad människa till jord.
- Kontaktström från ett uppladdat föremål till en människa.
- Gnisturladdning från ett uppladdat föremål till en människa.

Det visas att det är framförallt de två senare fallen som kan ge upphov till några mer komplicerade situationer och strömmar som kan överstiga satta begränsningar.

Effekten vid de två första fallen kan lindras genom användning av en elektriskt avskärmande dräkt. Denna dräkt kan ges olika utformning beroende på önskad avskärmning, men den är givetvis bara ett alternativ för dem som exponeras i arbetslivet. Uppladdningen av stora föremål, som stora fordon, kan medföra högre urladdningsströmmar. Lyckligtvis går vanligen en betydande del av urladdningsströmmen via fordonens däck direkt till jord och endast en mindre del drabbar den människa som tar i fordonet.

4.1 Hur människor reagerar på gnisturladdningar och kontaktströmmar

De begränsningar för kontaktströmmar som anges av ICNIRP och EU är ett resultat av omfattande volontärförsök som bedrivits åtminstone sedan 1930-talet. I en artikel av Charles F. Dalziel [36] redovisas försök från 1933 för att bestämma gränsen för förnimmelse eller perception för en kontaktström, dvs den lägsta ström som kan uppfattas vid full elektrisk kontakt. Medianvärdet för män uppmättes till 1,1 mA och för kvinnor till 0,7 mA. Av Figur 13, som återger en av graferna i Dalziels artikel, framgår att den satta begränsningen på 1,0 mA för arbetstagare skyddar ca 60 % av männen och ca 5 % av kvinnorna. Gränsen 0,5 mA skyddar ca 90 % av kvinnorna. Skyddsverkan för barn torde vara något sämre än för kvinnor.

Dalziel redovisar också resultat från försök med att bestämma gränsen för varaktig muskelkramp eller fastlåsning, i engelskspråkig litteratur benämnd Let-Go. Över den gränsen är risken stor för att en person inte kan släppa greppet om ett strömförande föremål. För 134 män uppmättes medianvärdet till 16 mA och 0,5 percentilen till 9 mA. Motsvarande värden för 28 kvinnor var 10,5 mA respektive 6 mA.

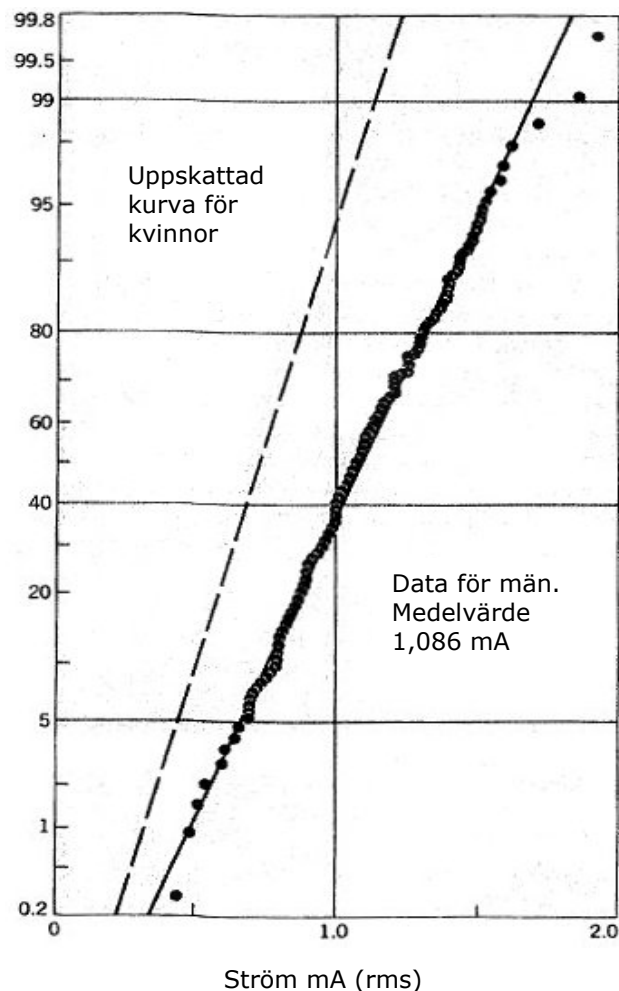
Dalziels uppgifter har återgetts i flera senare publikationer, bl a i den synnerligen utförliga publikationen med titeln *Transmission Line Reference Book. 345 kV and Above*, som togs fram inom EPRIs UHV-projekt (Electric Power Research Institute, Ultra High-Voltage) [37] och i IEC-standarden TS 60479-1 *Effects of current on human beings and livestock – Part 1: General aspects*, utgiven 2005 [38]. Från den senare skriften har Figur 14 reproducerats. Motsvarande uppgifter har också publicerats av ILO (International Labour Organization) 1994 [39], se Tabell 30 nedan, och av SSK (Strahlenschutzkommission) 1997 [40].

De av Dalziel bestämda gränserna för förnimmelse och varaktig muskelkramp bekräftas i en studie med något annan inriktning av Sweeney [41]. Han utgår från tröskelvärdet för exitering av en 20 µm myelinerad nervfiber och kan beräkna den strömtäthet i handleden som krävs för att uppnå förnimmelse. I handleden är andelen ledande vävnad låg och strömtätheten blir därmed hög i kvarvarande vävnad med högre ledningsförmåga; bl a i nervbanor och blodkärl. För att uppnå den kraftigare muskelpåverkan som gränsen för varaktig muskelkramp innebär, krävs exitering av underarmens muskler. Detta sker först vid en betydligt högre strömnivå, eftersom underarmen innehåller mer muskelvävnad och strömtätheten blir lägre. Män och kvinnor har olika andelar muskelvävnad och underhudsfett och får därmed olika beräknade tröskelvärden för förnimmelse och för varaktig muskelkramp. De av Sweeney beräknade värdena stämmer väl med de tidigare uppmätta. Gränsen för förnimmelse beräknas till 1,10 mA för män och 0,94 mA för kvinnor. Motsvarande uppmätta värden för 50-percentilen är 1,1 respektive 0,7 mA. Gränsen för varaktig muskelkramp (Let-Go nivå) beräknades av Sweeney till 15,9 mA för män och till 10,9 mA för kvinnor och motsvarande uppmätta värden är 15,9 mA och 10,5 mA. Överensstämmelsen är som synes mycket god!

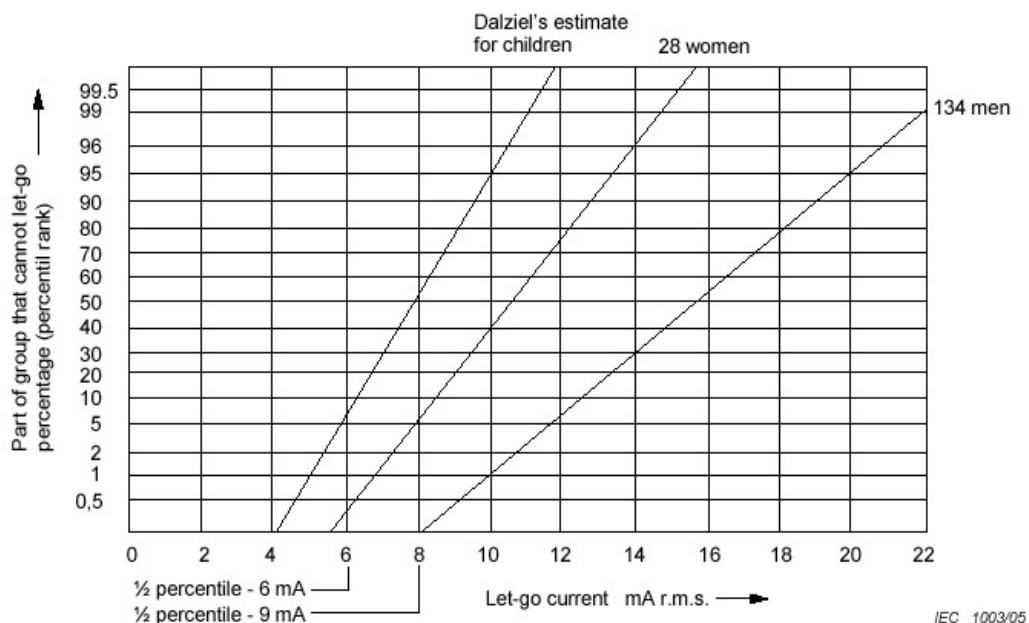
Även de kortvariga gnisturladdningarna har beskrivits utförligt i litteraturen. I EPRIs skrift från 1982 [37] ges en översikt av en serie försök för att bestämma gränserna för förnimmelse och obehag vid gnisturladdningar. Man har i

detta fall studerat påverkan vid kontakt via ett finger, via ankeln mot jord och mellan tummen och metallstången i ett paraply. Vädret har stor betydelse, torr väderlek höjer känslighetströskeln med ungefär en faktor 2. I Figur 15, som återges från EPRI [37], bedöms urladdningarna efter den ostörda elektriska fältstyrkan på 1 meters höjd, dvs det fält som laddar upp människan eller paraplyet.

Kontakt med större föremål medför kraftigare påverkan eftersom den laddningsuppsamlade ytan ökar. Likaså påverkas upplevelsen av hudens resistans. Ett barn med tunn hud på händerna antas vara mer känslig än en kvinna som i sin tur är mer känslig än en grovarbetande man. I allmänhet gäller att barnets gränser ligger på ca 50 % av mannens och kvinnan på ca 60 – 70 % av mannens. Detta visas i Tabell 31, som är en omarbetning efter ILO 1994 [39].



Figur 13. Gränsen för förnimmelse (perception) för kontaktström. Efter Dalziel 1972 [36].



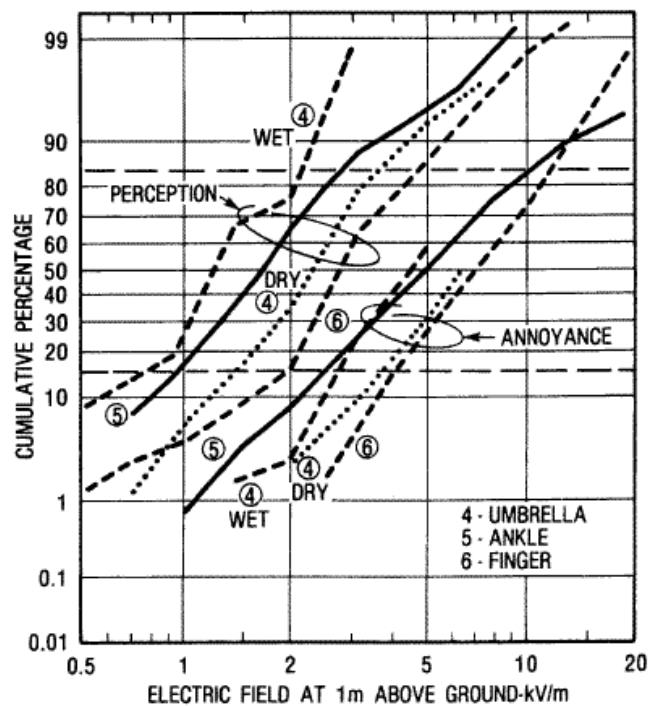
Figur 14. Gränsen för varaktig muskelkramp (Let-Go) för kontaktström. Efter IEC 60479-1 [38].

Effekter av en 50/60 Hz ström som passerar kroppen. Experimentella data för 50 % av barn, kvinnor och män. ("Touch" vanligen 1 cm ² och "Grasp" vanligen 15 cm ²)	Barn	Kvinnor	Män
	Ström i mA		
Förnimmelse vid kontakt med finger (touch)	0,18	0,24	0,36
Förnimmelse vid ett stadigt grepp	0,55 ^a	0,7	1,1
Icke smärtsam chock vid en större kontakt (grasp)	0,9 ^a	1,2	1,8
Smärta vid kontakt med ett finger	0,9 ^a	1,2 ^a	1,8 ^b
Smärtsam chock kan påverka muskelkontrollen. Varaktig muskelkramp (Let-go) för 0,5 % av befolkningen	4,5	6	9
Smärtsam chock, Gränsen för varaktig muskelkramp.	8 ^a	10,5	16
Svår chock, Andningssvårigheter	12 ^a	15	23

^a. Beräknade värden under antagande att värdet för barn är hälften och för kvinnor 2/3 av motsvarande värden för män.

^b. Beräknat värde från annan frekvens.

Tabell 30. Känslighet för kontaktströmmar. Efter ILO 1994 [39].



Figur 15. Gränserna för förnimmelse (perception) och obehag vid gnisturladdningar. Återgiven från EPRI 1982 [37].

Direkta och indirekta effekter av ett 50/60 Hz E-fält. Procentsatserna anger hur stor del av gruppen som påverkats. Personer och fordon som laddas upp av det elektriska fältet är isolerande från jord.	Barn	Kvinnor	Män
	Elektrisk fältstyrka (kV/m)		
10 % gränsen för förnimmelse (perception) vid urladdning från en person som laddats upp av ett elektriskt fält. Kapacitans till jord ca 170 pF.			0,6-1,5
50 % värdet för förnimmelse, i övrigt som ovan			1,2-2,5
Gränsvärdet för störningar på den mest känsliga typen av pacemaker.			2,5
50 % värdet för förnimmelsen vid kontakt med en bil via ett finger	2 - 2,5		
5 % värdet för förnimmelse i form av påverkan på hår på huvudet, urladdningar mellan klädesplagg			3
90 % värdet för förnimmelse för gnisturladdningar från en person som laddats upp av ett elektriskt fält. Kapacitans till jord ca 170 pF.			2,5 -6
50 % värdet för förnimmelse vid kontakt med en bil via ett finger.			4 - 5
50 % värdet för obehag i samband med gnisturladdningar då från en person som laddats upp av ett elektriskt fält. Kapacitans till jord ca 170 pF.			4 -7
0,5 % värdet för varaktig muskelkramp (Let-Go) vid kontakt med en lastbil	8 - 10	11 - 13	16 - 20
50 % värdet för smärta vid kontakt med en bil	10 - 12	14 - 16	20 - 24
0,5 % värdet för varaktig muskelkramp vid kontakt med en buss	11,5-14		
50 % värdet för förnimmelse i form av påverkan på hår på huvudet, urladdningar mellan klädesplagg.			20

Tabell 31. Känslighet för gnisturladdningar. Omarbetad efter ILO 1994 [39].

4.2 Kontaktströmmar från människor

Det som visats tidigare i framställningen är resultat av försök med levande människor och där resultatet har varit en beskrivning av hur obehaglig volontären upplever sin situation. Viktig information kan givetvis också fås genom att mäta upp aktuella strömmar till jord och till föremål. Övningar av detta slag har framförallt gjorts av EPRI inom ramen för det stora UHV-projektet [37] och av Vereinigte Elektrizitätswerke Westfalen (VEW) [42]. Med stöd av dessa mätningar har man sedan också tagit fram uttryck för att beräkna aktuella strömmar för mer generella fall.

Allmänt gäller att:

$$I_c = \omega \times \varepsilon \times E \times S, \text{ där} \quad [1]$$

$$\omega = 2 \times \pi \times f$$

$$\varepsilon = 10^{-9} / 36 \pi$$

E = den elektriska fältstyrkan (V/m)

S = den ekvivalenta laddningsuppsamlade ytan

Det kanske mest studerade fallet är strömmen till jord från en människa med längden (höjden) h som står i ett vertikalt och homogent elektriskt fält med fältstyrkan E och frekvensen f . För det fall då armarna hänger fritt längs med kroppen har det empiriskt kunnat visas att den ekvivalenta ytan S kan tecknas enligt:

$\pi \times (h \times \tan 35,7^\circ)^2$ och strömmen till jord via fötterna får då uttrycket:

$$I_c = 2 \times \pi \times f \times 10^{-9} \times E \times \pi \times (h \times \tan 35,7^\circ)^2 / 36 \pi$$

$$I_c = \pi \times (\tan 35,7^\circ)^2 \times 10^{-9} \times h^2 \times f \times E / 18$$

$$I_c = 9,0 \times 10^{-11} \times h^2 \times f \times E \quad [2]$$

I_c = kontaktströmmen (A), h = personens längd (m)

f = frekvensen (Hz), E = den elektriska fältstyrkan (V/m)

Med $h = 1,76$ m, $f = 50$ Hz och $E = 10\,000$ V/m fås att $I_c \approx 139 \mu\text{A}$.

Detta är ett empiriskt bekräftat uttryck då man mätt strömmen från en docka belagd med ett ledande ytterskikt. VEW [42] har upprepat detta med 111 försökspersoner, i genomsnitt 1,76 m långa och med en medelvikt av 75,6 kg. Man mätte då upp en kvot mellan strömmen till jord (I_c) och det yttre fältet (E) på $14,3 \mu\text{A} / \text{kV/m}$. Vid $E = 10 \text{ kV/m}$ fås därmed $143 \mu\text{A}$, att jämföra med ett beräknat värde på $139 \mu\text{A}$. Skillnaden är förhållandevis liten.

Dessa resultat kan jämföras med beräkningar som gjorts med UVic-modellen ($h = 1,77$ m) [27] och som gav $14,7 \mu\text{A} / \text{kV/m}$. För NORMAN ($h = 1,76$ m) redovisas $14,8 \mu\text{A} / \text{kV/m}$ [24] och för den något kortare NAOMI ($h = 1,63$ m) $12,9 \mu\text{A} / \text{kV/m}$.

I den tidigare Figur 2 visas den totala vertikala strömmen i UVic vid 1 kV/m , 60 Hz . Kurvan längst till höger avser en modell med fötterna i kontakt med jord. Kurvan i mitten avser en modell med fotsulorna $14,4 \text{ mm}$ ovan jord (skor) och kurvan längst till vänster avser en fullständigt isolerad modell långt ovan ett jordplan.

I nivå med fotsulorna avläses ca $17,6 \mu\text{A}$ vid 1 kV/m och 60 Hz . Vid 50 Hz fås därmed $50/60 \times 17,6 \mu\text{A} \approx 147 \mu\text{A}$.

Denna beräknade ström är den maximala som kan uppkomma när övergångsresistansen mellan fötterna och jord är noll. Så är i praktiken givetvis inte fallet. Skor ökar resistansen avsevärt, men även med bara fötter fås vanligen en resistans på minst 20 Ω , i många fall betydligt mer. Torr mark ger en övergångsresistans på flera k Ω .

Resistansen mellan de två fotsulorna och jord kan enligt Reilly [41] beräknas enligt följande:

$$R = \frac{1}{2} \times (R_f + R_M) \quad [3]$$

$$\text{där } R_f = \rho / 4 \times r \quad [4]$$

och

$$R_M = \rho / 4 \times \pi \times d \quad [5]$$

R_f = Resistansen för en fot. R_M = Den inbördes resistansen mellan två fötter.
 ρ = Markytans resistivitet. r = Den ekvivalenta radien för en fot.
 d = Avståndet mellan fötterna.

Med $r = 0,08$ m, $d = 0,5$ m och $\rho = 50$ Ω m fås att $R = 82$ Ω .

Denna resistans är ca 10 % av den totala resistansen mellan båda händerna och båda fötterna mätt i fuktigt tillstånd.

Om dockan eller försökspersonen har skor på fötterna påverkas resultatet dels av resistansen i skosulorna och dels av den kapacitans som sulornas tjocklek ger upphov till. EPRI [37] har studerat inverkan av sulornas tjocklek och funnit att strömmen till jord då reduceras med en term:

$$26,1 \times 10^{-22} \times h^3 \times f \times E / C \quad [6]$$

där C är kapacitansen i Farad mellan fotsulorna och marken.

För torra sulor har C mätts upp till ca 210 pF vid 0,5 cm tjocklek, ca 180 pF vid 1 cm, ca 170 pF vid 1,5 cm, ca 160 pF vid 2 cm och ca 140 pF vid 3 cm.

För en 1 cm tjock sula fås att strömmen I_c minskar med ca 30 %.

I det tidigare avsnittet 3.9 *Jordad eller ojordad modell* beskrevs hur strömmen ändras ner mot jord genom en modell jordad eller inte jordad via fötterna. Strömmens värde i ett godtyckligt snitt genom modellen kan uppskattas med hjälp av ett enkelt uttryck från EPRI [37].

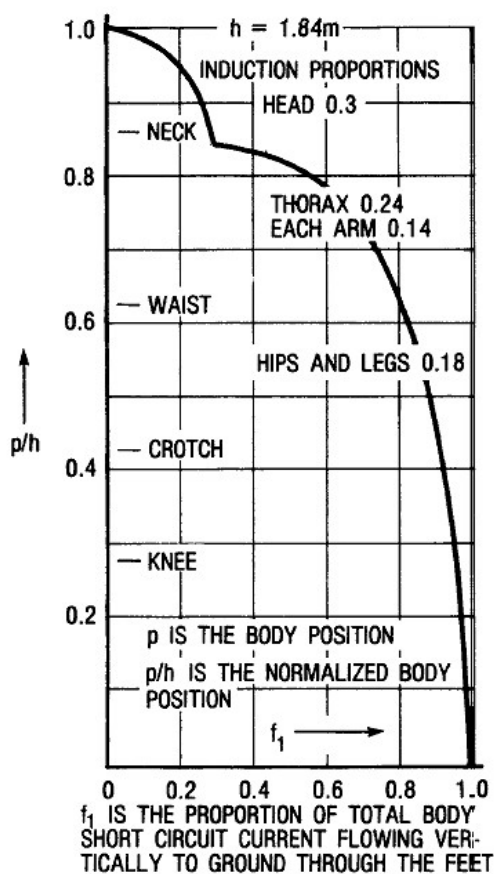
Strömmen genom ett snitt på höjden P ovan mark kan uppskattas med:

$$I (P/h) = 9,0 \times 10^{-11} \times h^2 \times f \times E \times f_1 (P/h) \quad [7]$$

där funktionen $f_1 (P/h)$ visas i Figur 16.

För hjässans topp är $f_1 = 0$ (ingen ström) och för fotsulorna 1 (full ström till jord). Med $E = 10 \text{ kV/m}$, $f = 60 \text{ Hz}$, $h = 1,77 \text{ m}$ och $P = 1,42 \text{ m}$ fås att $f_1 = 0,28$ och därmed att $I = 0,26 \times 169 \approx 44 \text{ }\mu\text{A}$.

Detta kan jämföras med Figur 2 som för motsvarande snitt ger knappt $50 \text{ }\mu\text{A}$ vid 10 kV/m och samma halstvårnsnitt. Då Figur 2 gäller för den något större UVic blir den faktiska skillnaden därtill ännu mindre.



Figur 16. f_1 som funktion av P/h . Efter EPRI 1982 [37].

Uppgifter av det här slaget finns också i IEC-standard 62226-3-1 [35]. Beräkningarna har gjorts med en homogen modell med en konduktivitet på $0,2 \text{ S/m}$ och med längden $1,76 \text{ m}$. Vid 10 kV/m , 50 Hz fås en ström genom hals-

tvärsnittet på $35\text{ }\mu\text{A}$ och en totalström till jord på $134\text{ }\mu\text{A}$. Vid 60 Hz ökar strömmen med en faktor 1,20 och då fås $42\text{ }\mu\text{A}$ respektive $161\text{ }\mu\text{A}$.

Sammanfattningsvis kan man konstatera att:

- För gruppen Allmänheten skall kontaktströmmarna begränsas till $0,5\text{ mA}$ och för den grupp som exponeras som arbetstagare, skall de begränsas till $1,0\text{ mA}$.
- Gruppen Allmänheten exponeras ytterst sällan för fältstyrkor överstigande 10 kV/m . Arbetstagare kan möjligen vid arbete i lågbyggda 400 kV ställverk exponeras för fältstyrkor runt 20 kV/m [7].
- Det finns ett antal oberoende beräkningsalternativ för totalström till och ström genom ett visst tvärsnitt i kroppen, t ex halsen. Av dessa tar endast NORMAN & NAOMI och UVic modellerna hänsyn till kroppens inhomogena konduktivitetsfördelning. Metoderna ger, trots skillnader i modellerna, ett likartat resultat.
- Den maximala kontaktströmmen från en uppladdad människa till jord kan beräknas. De i verkligheten förekommande kontaktströmmarna kan uppskattas och de är i princip alltid lägre än den maximala.
- Kontaktströmmen är bl a beroende av den elektriska fältstyrkan (E), frekvensen (f) och kroppslängden h . För en person med $h = 2,0\text{ m}$ fås vid 10 kV/m , 50 Hz , maximalt $180\text{ }\mu\text{A}$.
- Kontaktströmmar utgör i praktiken ingen begränsning för det högsta acceptabla elektriska fältet. För Allmänheten (vid $E \leq 10\text{ kV/m}$) fås maximalt $0,18\text{ mA}$ och för Arbetstagare maximalt (vid $E \leq 20\text{ kV/m}$) $0,36\text{ mA}$, d v s väl under gränserna $0,5$ respektive $1,0\text{ mA}$.
- De maximala kontaktströmmarna, $0,18$ och $0,36\text{ mA}$, motsvarar gränserna (ca $0,2$ percentilen) för förnimmelse eller perception vid kontakt via ett finger för kvinnor respektive män.

4.3 Gnisturladdningar från människor

Om en människa står i ett elektriskt fält och på ett isolerande underlag (ex vis skor med gummisula) kommer hon att laddas upp av fältet. När hon sedan vidrör ett jordat föremål sker en snabb gnisturladdning till jord, som sedan kan övergå i en kontinuerlig kontaktström om strömbanan inte bryts igen.

Fallet med gnisturladdningar från människor till jord omnämns bara i några få artiklar. Orsaken torde vara att sådana urladdningar bara i undantagsfall kan ge upphov till några mer allvarliga problem, obehag är däremot mer vanliga.

Den spänning (U_c) som en person kan laddas upp till är en funktion av den elektriska fältstyrkan (E), var personen befinner sig i förhållande till spänning och till jord och impedansen mellan personen och jord.

Maximal spänning fås då personen står på ett isolerande underlag och då bestäms spänningen av kapacitansen (C) till jord. Spänningen U kan då tecknas enligt EPRI [37] som:

$$U_c = I_c / \omega C, \quad [8]$$

där I_c är strömmen till jord, se ekv [1]

Kapacitansen C beror av fotsulornas höjd ovan ledande mark och är ca 150 pF vid 2 cm, 180 pF vid 1 cm och ca 210 pF vid 0,5 cm.

Med $h = 2,0$ m; $f = 50$ Hz; $E = 10$ kV/m och $C = 180$ pF fås att:

$I_c = 0,18$ mA och att $U_c = 3,2$ kV.

Mätningar vid EPRI [37], med ett flertal personer och utförd vid olika väderlek, har visat att den maximala spänningen vid ett torrt och isolerande underlag kan uppgå till:

$$U_c = 0,42 \times E \quad [9]$$

Där 0,42 är en empiriskt funnen konstant. Med $E = 10$ kV/m fås 4,2 kV, vilket stämmer rimligt väl med ovanstående 3,2 kV.

I praktiken är inte skor och underlag fullständigt isolerande och därför når spänningen endast i undantagsfall upp till dessa förhållandevis höga nivåer. Mätningar vid EPRI [37], med ett antal försökspersoner och vid olika väderlek, har visat att spänningen U_c i praktiken kan variera mellan 0 och:

$$U_c = 0,3 \times E \quad [10]$$

Vilket med $E = 10$ kV/m ger maximalt 3 kV.

Sammanfattningsvis kan man konstatera att:

- En människa i ett elektriskt fält laddas upp till en spänning som bl a beror av fältets storlek och förlusterna via skosulorna till jord. Med isolerande skor fås en högsta spänning av:

$$U_c = 4,2 \text{ kV vid } E = 10 \text{ kV/m}$$

I praktiken blir spänningen i allmänhet lägre p g a av förlustströmmar via skosulorna till jord och motsvarar vid dessa nivåer ungefär 50 %-värdet för obehag hos män.

4.4 Kontaktströmmar från större föremål

Det har i tidigare avsnitt visats hur människor i ett elektriskt fält laddas upp och hur de kan vara en källa för en kontinuerlig ström – en kontaktström. Strömmen storlek är beroende av den laddningsuppsamlade ytan. Faktorn $9,0 \times 10^{-11}$ i ekv [2] är en funktion av kroppens laddningsuppsamlade yta. Detta innebär att ett föremål med större yta ger upphov till en större ström.

Enligt EPRI [37] gäller allmänt att den inducerande strömmen i ett föremål nära jord kan tecknas:

$$I_c = j \times \omega \times \varepsilon \times E \times S, \text{ där} \quad [11]$$

$\varepsilon \approx 1 \times 10^{-9} / 36 \pi$ och S är den s k ekvivalenta laddningsuppsamlade ytan.

S är inte identisk med den faktiska ytan, men kan beräknas för kroppar med "enkel" geometri och för andra kroppar får den uppskattas. EPRI lämnar mycket information om beräkning av den ekvivalenta ytan.

Det bör också påpekas att E är fältstyrkan på en ekvivalent höjd som styrs av kvoten mellan överyta och sidoyta. Den ekvivalenta höjden är alltid mindre än totalhöjden, men närmar sig denna då sidoytorna minskar. En beräkning med fältet vid totalhöjden ger ett konservativt resultat, d v s mer eller mindre överskattar induktionen.

För att visa beräkningsgången följer nedan en beräkning av strömmen från ett rätblock eller en standard 20 fots container uppställd 0,1 m ovan mark.

Containerns längd, $A = 6,0$, bredd, $B = 2,5$ och höjd ovan mark, $H = 2,5$ m

Med beteckningar enligt figur 8.8.2 i [37] (återgiven i denna rapport som Figur 17) fås att: $A / B = 2,4$ och att $H / B = 1,0$ och därmed fås ur figuren att $S / (A \times B) \approx 5,0$.

$$S = 5,0 \times 6,0 \times 2,5 = 75 \text{ m}^2.$$

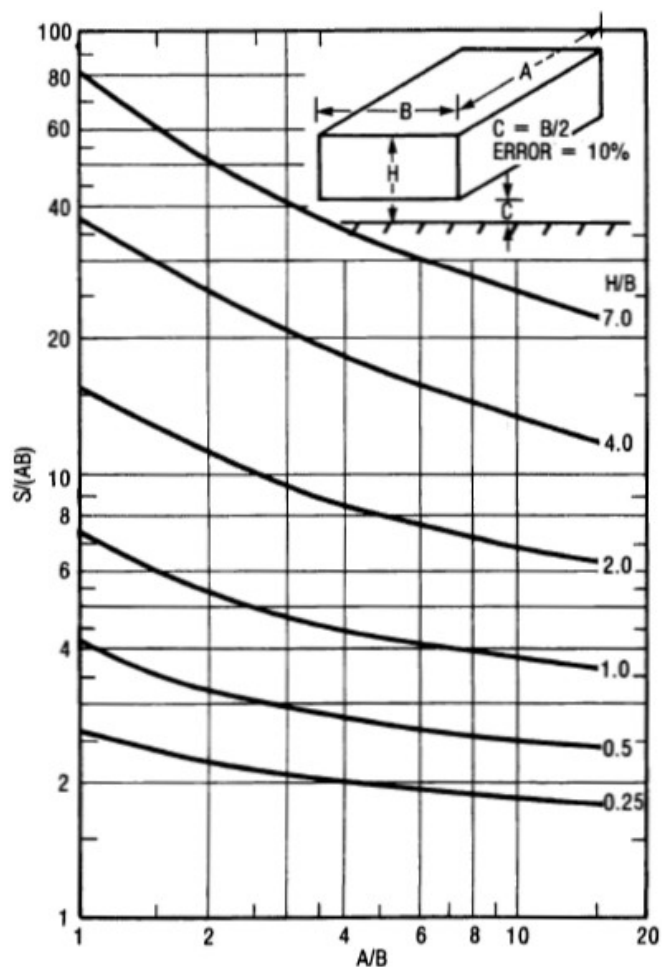
Strömmen tecknas som:

$$I_c = \omega \times \varepsilon \times E \times S \quad [12]$$

och med $\omega = 2 \times \pi \times 50$; $\varepsilon \approx 1 \times 10^{-9} / 36 \pi$ och med $E = 10 \text{ kV/m}$ fås att:

$$I_c = 2,1 \text{ mA}$$

En 20 fots container har en stor laddningsuppsamlade yta och strömmen blir förhållandevis stor.



Figur 17. Kurvskara för beräkning av den ekvivalenta ytan S . Återgiven efter EPRI 1982 [37].

EPRI har genomfört beräkningar och mätningar med en lång rad olika fordon, både personbilar och större fordon som lastbilar och bussar. I Tabell 32 ges en sammanfattning av EPRI:s resultat:

Föremål	Maximal ström (mA) vid $E = 10 \text{ kV/m}$, 60 Hz homogent fält	Kapacitans till jord (pF)
Trailer med totallängd 15,75 m varav trailer 12,2 m, bredd 2,4 m och höjd 3,7 m	6,4	2000-3000
Tankbil med totallängd 13,8 m varav trailer 10,3 m, bredd 2,0 m och höjd 2,6 m	4,0	-
Buss med totallängd 10,4 m, bredd 2,4 m och höjd 2,8 m	3,9	1800
Personbil med längd 5,7 m, bredd 1,9 m och höjd 1,5	1,1	
Personbil med längd 4,6 m, bredd 1,78 m och höjd 1,37 m	0,88	800
Häst med längden 2 m och mankhöjden 1,25 m. Vikt 385 kg	0,27	180
Ko med längden 2 m och mankhöjden 1,17 m. Vikt 318 kg	0,24	200

Tabell 32. Influens i olika föremål. Återgiven efter EPRI 1982 [37].

Det har ovan redan antytts att isolationen mellan fordon och underlag är avgörande för storleken av den uppladdningsström som kan förekomma i praktiken. EPRI [37] har studerat detta vid en serie mätningar utförda vid två tillfällen per månad under ett helt år. Mitt i ett spann under en 3-fasig kraftledning har man mätt strömmen från en buss, från en Jeep Wagon och från en traktor. Vid vart tillfälle har mätningar genomförts med fordonen placerade på tre olika underlag; på asfalt, på makadam och på en grusväg. Mätimpedansen har anpassats så att strömmen motsvarar den som en människa, stående på samma underlag, skulle kunna uppleva.

Resultatet från denna studie visar att typ av fordon, underlag och väder påverkar den maximala uppladdningsströmmen. Allmänt gäller att den största spridningen fås med fordonen på grusvägen, den uppmätta strömmen varierar då mellan 0,1 % och 100 % av den maximala och 90:e percentilen varierar mellan 10 och 50 %. Med asfalt och makadam fås däremot betydligt mindre spridning och inga värden överstiger 30 % av de maximala.

Däcken är en annan faktor som påverkar isolationen mot jord. VEW har varit verksamma även inom detta område och bl a kontrollerat ett stort antal däck för personbilar, bussar och lastbilar [42]:

Personbil: Medelvärde 22 M Ω , från 100 k Ω till 350 M Ω

Lastbil/buss: Medelvärde 240 k Ω , från 6 k Ω till 870 k Ω

Den betydligt lägre resistansen för de tyngre fordonen beror på att deras kraftigare däck är uppbyggda med en stålarmering (cord) i sidorna. Däcken för personbilar har textilcord i sidorna och textil- eller stål cord som underlag för slitytan.

En undersökning med 29 personbilar och 40 lastbilar & bussar, alla uppställda på isolerande underlag i homogent fält, visade på ett linjärt samband mellan ström och fordonens laddningsuppsamlade yta. Man fann att om fordonets längd betecknas L , dess bredd B och dess höjd H , fås att:

A_0 = den laddningsuppsamlade ytan = $L \times B + 2 \times H \times (L + B)$ (m^2) [13]
 E_0 = storleken av det ostörda fältet (kV/m)

$$I_C (\mu A) = 3,3 \times A_0 \times E_0 \quad (\text{vid } 50 \text{ Hz}) \quad [14]$$

Utgående från samma laddningsuppsamlade yta ger detta uttryck ett ca 20 % högre värde än det som kan beräknas med EPRIs uttryck [12].

Om kontaktströmmar från större föremål kan därmed sammanfattas:

- Stora föremål, med stor laddningsuppsamlade yta, kan ge upphov till förhållandevis höga kontaktströmmar.
- Det finns möjligheter att uppskatta den *maximala* kontaktströmmen från enkla geometriska kroppar och från olika typer av fordon.
- Den *verkliga* kontaktströmmen från ett fordon är kraftigt påverkad av däckens ledningsförmåga och markens resistivitet. Det är endast i undantagsfall som strömmen når det maximala värdet.
- Vid *maximal uppladdning* av en personbil under en 400 kV kraftledning, till en kontaktström av ca 1 mA, kommer gränsen för förnimmelse (perception) att passeras för ca 40 % av männen och för 95 % av kvinnorna.
- Vid *maximal uppladdning* av en större lastbil under en 400 kV kraftledning, till en kontaktström av ca 5 mA, kommer gränsen för varaktig muskelkramp (Let-Go) att passeras för < 0,5 % av kvinnorna och 1 % av barnen.

4.5 Gnisturladdningar från större föremål

I det tidigare avsnittet visades att stora fordon kan ge upphov till höga kontaktströmmar. Detta innebär också att de kan laddas upp till förhållandevis höga spänningar och därmed ge upphov till obehagliga gnisturladdningar.

Maximal kontaktström och uppladdningsspänning fås vid perfekt isolation mellan fordon och mark. Detta kräver en torr vägbana och en vägbeläggning utan inslag av mer eller mindre halvledande ämnen. Vid dessa fall bestäms spänningen av strömmen och kapacitansen till jord.

EPRI [37] redovisar mätningar av kapacitansen mellan olika typer av fordon och jord. En personbil har en kapacitans till jord på ca 800 pF, en liten lastbil ca 1 000 pF, en buss ca 1 800 pF och en längre trailer har 2 000 – 3 000 pF.

Motsvarande uppgifter redovisas även i VEWs undersökning [42]. Man har där funnit att kapacitansen är proportionell mot fordonets yta enligt uttrycket:

$$C_E \text{ (pF)} = 54 \times L \times B \quad [15]$$

För en personbil med måtten $L = 4,5 \text{ m}$ och $B = 1,8 \text{ m}$ fås att $C_E \approx 440 \text{ pF}$ och för en buss med måtten $L = 10,5 \text{ m}$ och $B = 2,5 \text{ m}$ fås att $C_E \approx 1400 \text{ pF}$. Dessa siffror är generellt lägre än de EPRI redovisar och det är svårt att med säkerhet förklara skillnaden. Siffrorna från EPRI ges förvisso med ett visst spann, för bilen t ex mellan 700 och 930 pF, men detta förklarar inte avvikelserna mot VEW.

Kapacitansen till jord är en kritisk faktor och det kan därför vara befogat att kontrollera det rimliga i ovanstående siffror. Emellertid är det inte enkelt att beräkna denna för en sådan konfiguration som en parkerad bil på ledande mark. Att bara ta hänsyn till kapacitansen mellan underredet och jord ger en för låg kapacitans och bidraget från bilens sidor är betydligt svårare att uppskatta.

I en IEEE-artikel från 1975 av P S Maruvada och N Hyltén-Cavallius [43] ges anvisningar för hur kapacitansen mellan ett föremål och jord skall beräknas. Artikeln behandlar cylindrar, toroider och andra föremål i högspänningslaboratorier, men även rätvinkliga block eller boxar. De olika fallen har beräknats numeriskt och sedan normaliserats till ett antal standardformer. Se följande exempel och kurvskaror hämtade ur artikeln:

Antag att blockets sidor är a , b och c . Dess höjd ovan jord är Δ . Längderna normaliseras så att $a = a' = 1,0$.

$$b' = b/a \quad c' = c/a \quad \Delta' = \Delta/a$$

På den vertikala axeln i diagrammet anges kvoten mellan kapacitansen C och $2 \pi \epsilon_0 l_e$, där $\epsilon_0 \approx 10^{-9} / 36 \pi$ och

$$l_e = \text{ekvivalenta längden definierad som } l_e = (a + b + c) / 3$$

För den ovan nämnda personbilen med markfrigång $\Delta = 0,2 \text{ m}$ fås:

$$L = a = 4,5 \text{ m}; B = b = 1,8 \text{ m}; H = 1,08 \text{ m} \Rightarrow c = 1,08 - 0,2 = 0,88 \text{ m}$$

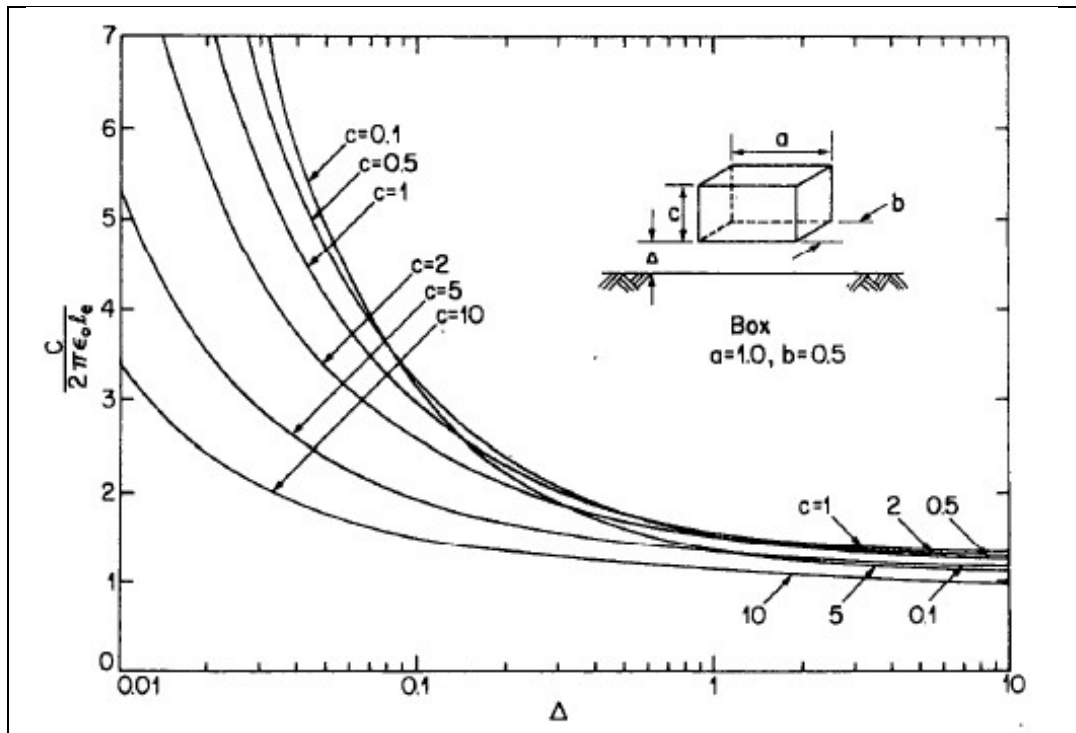
$$a' = 1,0; \quad b' = 1,8 / 4,5 = 0,4; \quad c' = 0,88 / 4,5 = 0,20$$

$$\Delta' = 0,2 / 4,5 = 0,044$$

$$l_e = (4,5 + 1,8 + 0,88) / 3 \approx 2,39$$

Då $b / a = 0,4$ används Figur 18 och då fås att $C / 2 \pi \varepsilon_0 l_e \approx 5,3$, dvs att $C \approx 5,3 \times 2 \pi \times 10^{-9} \times 2,39 / 36 \pi \approx 704 \text{ pF}$.

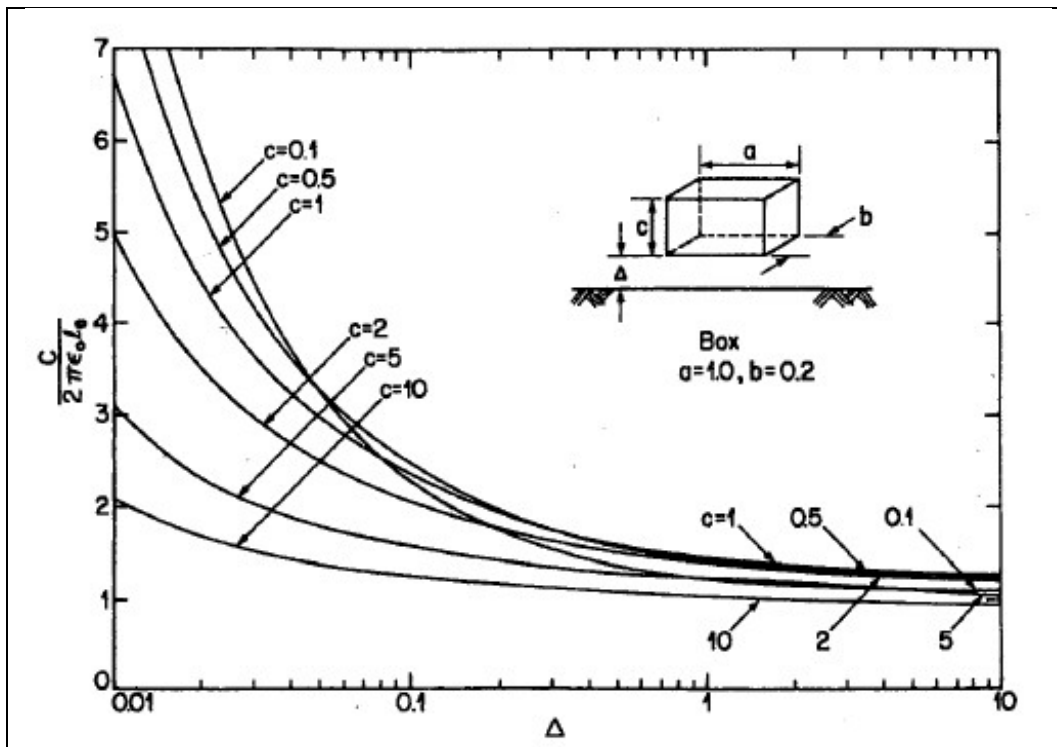
För beräkningar då $b' = b / a$ ligger närmare 0,2 används Figur 19.



Figur 18. Normaliserade kapacitanser för en låda med $a = 1$ och $b' = 0,5$. Efter Maruvada och Hyltén-Cavallius [43].
Observera att c och Δ i figuren skall läsas som c' och Δ' .

Detta värde stämmer tämligen väl med EPRIs uppmätta värden på 700 – 930 pF. En något högre kapacitans fås om man tar hänsyn till kapacitansen mellan däck och jord och detta kan göras genom att betrakta avståndet Δ som ett medelavstånd inklusive däck. Antag att Δ (inklusive däck) = 0,15 m och därmed att $\Delta' = 0,15 / 4,5 = 0,03$. Med dessa uppgifter fås med Figur 19 att $C / 2 \pi \varepsilon_0 l_e \approx 7,0$ och därmed att $C \approx 930 \text{ pF}$.

Detta visar att det med enkla metoder går att uppskatta kapacitansen mellan ett fordon eller annat föremål och jord.



Figur 19. Normaliserade kapacitanser för en låda med $a = 1$ och $b' = 0,2$. Efter Maruvada och Hyllén-Cavallius [43]. Observera att c och Δ i figuren skall läsas som c' och Δ' .

Med kännedom om kapacitansen mellan föremål och jord kan den maximala spänningen U_c tecknas som:

$$U_c = I_c / \omega \quad [8]$$

där I_c är strömmen till jord och $\omega = 2 \pi \times f$.

För bussen i Tabell 32 med $C_E = 1800 \text{ pF}$ och med $L = 10,4 \text{ m}$, $B = 2,4 \text{ m}$ och $H = 2,8 \text{ m}$ fås att

$$A_0 = 10,4 \times 2,4 + 2 \times 2,8 \times (10,4 + 2,4) \approx 97 \text{ m}^2.$$

Med $E_0 = 10 \text{ kV/m}$, 50 Hz fås vidare med ekvation [14] att:

$$I_c \approx 3,3 \times 97 \times 10 \approx 3,2 \text{ mA}$$

Med ekvation [8] fås sedan att:

$$U_c = 0,0032 / (2 \pi \times 50 \times 1800 \times 10^{-12}) \approx 5,6 \text{ kV}$$

I det tidigare avsnittet om kontaktströmmar från uppladdade föremål nämndes en serie mätningar av kontaktströmmen från olika fordon under ett helt år. I denna studie ingick även att mäta spänningen från samma fordon (buss, traktor och en Jeep Waagon) stående på tre olika typer av underlag – på asfalt, makadam och på en grusväg. Mätuppställningen anpassades så att resultatet motsvarade den spänningen som en människa, stående på samma underlag, skulle kunna uppleva.

Spridningen i materialet är stor, men i 50 % av fallen överskrider inte kvoten mellan den uppmätta spänningen uttryckt kV och det ostörda fältet i kV/m 0,10 och den når inte i något fall upp till 0,50. (Motsvarande beräknade faktor för skolbussen ovan är 0,56.)

Om gnisturladdningar från fordon och andra föremål kan sammanfattas:

- Stora fordon kan under vissa förutsättningar bli uppladdade till förhållandevis höga spänningar.
- I praktiken blir spänningen vanligtvis betydligt lägre då den påverkas av däckens ledningsförmåga och markens resistivitet. Det är endast i undantagsfall som spänningen når det maximala värdet.
- Vid maximal uppladdning av en personbil under en 400 kV ledning kommer 50 % av barnen att uppleva en kontakt med bilen som smärtsam.
- Vid maximal uppladdning av en lastbil under en 400 kV kraftledning kommer ca 1 % av barnen och < 0,5 % av kvinnorna att passera gränsen för varaktig muskelkramp vid kontakt.

5 Rekommendationer för arbete i höga fält

5.1 Bedömningsgrunder

Det är på inga sätt en lätt uppgift att ge rekommendationer för arbete i höga elektriska och magnetiska fält. Exponeringsmiljöerna är kraftigt varierande och kriterierna för hur fältets nivå skall bedömas är föränderliga. Rekommendationerna nedan har därför måst göras "flexibla" och anpassningsbara till den skyddsnivå man önskar uppnå. Generellt gäller att rekommendationerna ges för personer som exponeras i arbetslivet, som en direkt följd av arbetet. Personerna skall vara medvetna om att de exponeras, så att de kan vidta lämpliga åtgärder för att minska sin exponering och följderna därav.

Bland de styrande dokumenten ger ICNIRP Guidelines från 2010 [18] den högsta skyddsnivån och förslaget till nytt EMF-direktiv, från CEEMET IEG [23], den lägsta skyddsnivån.

Nedan ges rekommendationerna uppdelat i elektriska och magnetiska 50 Hz fält. För det lägre frekvensområdet medger fysikens lagar att fälten kan beräknas var för sig, men fälten samverkar i sin påverkan på människokroppen. ICNIRP nämner helt kort något om detta i sina Guidelines från 2010 [18]. Det påpekas där att det skulle vara ett mycket konservativt antagande att de båda fältkomponenterna skulle samverka maximalt i en och samma punkt i kroppen. Det magnetiska fältet ger som tidigare nämnts upphov till cirkulerade strömmar i kroppen, med högst amplitud i strömbanornas periferi, medan det elektriska fältet medför strömmar som vanligen går från hjässan ner till fötterna. Det är dock bara i undantagsfall som sådan samverkan av fältkomponenterna kan vara av någon större betydelse. Följande beräknings-exempel visar hur en sådan samverkan kan ske. Det antas här att det elektriska och det magnetiska fältet samverkar i hjärnan och där ger upphov till inre fältstyrkor, som är vinkelräta mot varandra och kan adderas vektoriellt.

Exponeringssituation: En person står rakt under en ledare i ett fack i ett 420 kV ställverk och tittar i ledarens riktning. Det elektriska fältet träffar personen vertikalt, d v s i den mest ogynnsamma riktningen. Det magnetiska fältet träffar huvudets sida, även detta i den mest ogynnsamma riktningen. Ledarna i facket ligger på 7,5 m höjd och då personen antas vara 2 m lång, fås ett effektivt avstånd mellan ledare och exponerad på hjärna på 5,5 m. Ledaren antas vara belastad med 3 000 A.

För beräkning av det magnetiska fältet antas en förenklad geometri där fältet kan beräknas som fältet från en lång rak ledare. För detta fall kan B-fältet vid huvudet beräknas till 109 μT .

Enligt beräkningar av Dimbylow [24] ger ett magnetfält riktat sida-sida upphov till en inre fältstyrka av 31,4 – 33,0 mV/m per mT. Med ett fält på 109 μT fås $0,109 \times 33 \text{ mV/m} = 3,6 \text{ mV/m}$.

För beräkning av det elektriska fältet kan inte geometrin förenklas så långt, utan hänsyn har tagits till de tre faserna, till ledarna i facket och till en högre liggande luftledning. För beräkning har samma enkla analytiska programvara från EPRI använts som i det tidigare Elforskprojektet [7] om fält i ställverksmiljö. För en punkt 2 m ovan mark och rakt under en ledare i en ytterfas har E-fältet beräknats till 10 kV/m, riktningen är i princip vertikal. För maximal påverkan på människan antas fältet vara helt vertikalt.

Dimbylow har även beräknat inverkan av ett elektriskt fält [24] och funnit att för en person med fötterna i kontakt med jord fås 1,65 – 2,02 mV/m per kV/m. Med ett yttre fält på 10 kV/m fås $10 \times 2,02 \text{ mV/m} = 20,2 \text{ mV/m}$.

De två fältkomponenterna är riktade horisontellt (B) respektive vertikalt (E) och den resulterande fältstyrkan kan beräknas till 20,5 mV/m.

För detta högst realistiska fall är inverkan av det magnetiska fältet måttlig. Även om exponeringsförhållandena ändras påtagligt, får inte det magnetiska fältet någon större inverkan.

Kortare avstånd till fasledarna i kombination med större fasavstånd kan ge upphov till ett E-fält på 20 kV/m per 2 meters höjd. Med detta fås en inre fältstyrka på 40,4 mV/m. Det magnetiska fältet ökar på motsvarande sätt till 150 µT och den därav orsakade inre fältstyrkan blir ca 5 mV/m. Den resulterande fältstyrkan blir i detta fall 40,7 mV/m. Marginalen är fortfarande betryggande till gränsvärdet på 100 mV/m.

Ett annat möjligt fall skulle kunna vara Arbete Med Spänning, med barhandsmetoden, då avståndet till spännings- och strömförande ledare blir kort. Sammanlagring förutsätter dock att man av någon anledning utesluter den ledande dräkten som normalt utgör ett mycket effektivt skydd mot det elektriska fältet.

Det förefaller med andra ord osannolikt att sådan samverkan av det elektriska och det magnetiska fältet skulle kunna ge upphov till några mer betydande problem.

5.2 Risk- och närområde

Det s k riskområdet (se avsnitt 2.1) runt en spänningsförande ledare ger redan idag goda möjligheter att hantera olika exponeringssituationer. Enligt standarden SS-EN 50 110-1:2005 finns restriktioner för arbete inom riskområdet och som kan nyttjas för detta syfte. För 70 kV är avståndet 0,75 m, för 130 kV 1,1 m, för 220 kV 1,6 m och för 420 kV är avståndet till riskområdets yttre gräns 2,8 m.

Utanför riskområdet finns det s k närområdet (se avsnitt 2.1) som även det medför vissa restriktioner för arbete. För 70 kV är avståndet 1,75 m, för 130 kV 3,0 m, för 220 kV 3,0 m och för 420 kV är avståndet till närområdets yttre gräns 5,3 m.

Begreppen risk- och närområde gäller givetvis bara för oisolerade ledare.

5.3 Arbete i höga elektriska fält

Rekommendationerna utgår från arbete på luftledningarna och i ställverk, i båda fallen 70 - 420 kV.

Fältets storlek i kV/m är en given begränsning i de aktuella dokumenten. Inverkan av detta beskrivs i den senare delen av detta avsnitt.

Storleken av den kontinuerliga kontaktströmmen är genomgående begränsad till 1,0 mA. En kontaktström kan flyta när en människa, som laddats upp av ett elektriskt fält tar i ett jordat föremål. Vid ett yttre fält av 10 kV/m kan en upprättstående människa genomflytas av maximalt ca 180 μ A kontaktström. För att nå upp till maximala 1 mA krävs ett yttre fält på hela 55 kV/m. En maximal kontaktström på 1 mA utgör därmed i praktiken ingen begränsning.

Kontaktströmmens storlek är beroende av den laddningsuppsamlade ytan. En större yta, som hos en lastbil, ger upphov till en högre ström. Vid 10 kV/m fås maximalt ca 4 – 8 mA, men det förutsätter att bilen parkerats på ett väl isolerande underlag. Om större fordon eller andra föremål måste placeras under luftledningarna för högre spänning eller i ställverksmiljö, bör man se till att de har en förbindning till jord. För ex vis en grävmaskin i rörelse kan en kätting som släpar mot marken vara en praktisk lösning på detta problem.

En gnisturladdning är ett transient fenomen som kan uppstå när ett uppladdat föremål kommer nära en jordad punkt. Människor kan laddas upp till 3-4 kV vid ett yttre fält på 10 kV/m. Detta kan upplevas som obehagligt, men är inte farligt i sig. Vid uppladdning av större föremål, som lastbilar, kan man få högre spänning och mer smärtsamma urladdningar. Vanligen begränsas uppladdningsspänningen av däckens ledande förmåga, men en jordförbindning löser även dessa problem.

De tre utvalda styrande dokumenten, ICNIRP Guidelines 2010 [18], EUs förslag från juni 2011 [21] och förslaget från CEEMET i jan 2012 [23], är alla snarlika vad det gäller begränsningen av det elektriska fältet. ICNIRP anger 10 kV/m som Reference level, d v s en nivå där gränsvärdet inte kan överskridas. De två andra dokumenten anger 10 kV/m som en nivå där hälsan inte skall påverkas och 20 kV/m som nivå där gränsvärdet skall innehållas och inga indirekta effekter som gnisturladdningar skall uppkomma. Båda dokumenten anger att högre fältstyrkor kan accepteras om problemen med besvärande gnisturladdningar kan hanteras på annat sätt. Även ICNIRP medger högre fältstyrkor så länge som inte gränsvärdet överskrids.

De rekommendationer som ges i Tabell 33 bygger på beräkningar av den elektriska fältstyrkan som gjorts i samband arbetet med rapporten Arbete i höga fält – Luftledningarna 70 -400 kV [6]. De redovisade avstånden gäller för en tänkt vertikal linje mellan mark och mittfas (ytterfas ger generellt kortare avstånd) och i stolpens plan.

Begränsning för elektriskt fält (kV/m)	Referens	Beräknat minimiavstånd (m)			
		Risk- och näravstånd			
		77 kV	135 kV	220 kV	420 kV
		0,75 m 1,75 m	1,1 m 3,0 m	1,6 m 3,0 m	2,8 m 5,3 m
10	ICNIRP 2010, Reference level för centrala nervsystemet. EU förslag juni 2011, Orientation value. Ingen skadlig påverkan på kroppen. Förslag CEEMET. Lower action value.	0,85	1,45	2,90	4,95
20	EU förslag juni 2011. Action value. Gränsvärdet skall ej kunna överskridas. Förslag CEEMET. Action value för huvud och bål. Gränsvärdet för Health effects skall ej kunna överskridas.	0,45	0,75	1,50	2,55
24	ICNIRP 2010. Sammanfattning av dosimetriska uppgifter för perifera nervsystemet utan extra säkerhetsfaktor, motsvarar Basic restriction.	0,35	0,60	1,25	2,15
38	ICNIRP 2010. Sammanfattning av dosimetriska uppgifter för centrala nervsystemet utan extra säkerhetsfaktor, motsvarar Basic restriction.	0,25	0,40	0,75	1,35

Tabell 33. Rekommendationer för arbete i höga elektriska fält.

Om luftledningarna kan också följande tilläggas:

Fältstyrka 2 m ovan mark:

77 kV: < 5 kV/m. 135 kV: < 5 kV/m. 220 kV: < 10 kV/m. 420 kV: - 12 kV/m

Högsta värden vid klättring längs stolpben:

77 kV: <10 kV/m. 135 kV: 20 kV/m. 220 kV: 20-30 kV/m.

420 kV 30-35 kV/m

Fältstyrkan är generellt hög längs stolpbenen men fältet är riktat mer eller mindre in mot stolpen, d v s det sammanfaller inte med kroppens längdaxel. Detta innebär att fältet får en mer begränsad påverkan än vad ett motsvarande vertikalt fält skulle medföra.

Den elektriska fältmiljön i ställverksmiljö är mer komplex än motsvarande vid luftledningar, men med rimlig generalisering kan man göra följande sammanfattning:

Fältstyrka 2 m ovan mark:

70 kV: 5 kV/m. 130 kV: 5-10 kV/m. 220 kV: 10-15 kV/m.

420 kV: 12-15 kV/m

Vid närområdets yttre gräns:

70 kV: 5 kV/m. 130 kV: 5-10 kV/m. 220 kV: 10-15 kV/m.

420 kV: 10-20 kV/m

Vid riskområdets yttre gräns:

70 kV: 15-20 kV/m. 130 kV: 20 kV/m. 220 kV: 15-20 kV/m.

420 kV: 15-45 kV/m

Kommentarer

Man skall sträva efter att så långt som möjligt begränsa sin exponering för höga elektriska fält, både vad det gäller nivå och varaktighet. Avståndet till källan för fältet är en faktor som har en avgörande inverkan på fältets nivå.

Begränsningen på 10 kV/m utgör en faktisk och svår begränsning i ett flertal fall. Den kan inte efterlevas med vissa arbetsuppgifter som utförs idag. Den blir begränsande på mark under luftledningar och i ställverk, vid klättring längs stolpben och vid närområdets yttre gräns.

Begränsningen på 20 kV/m är mindre kritisk. Det bör vara möjligt att utföra de flesta arbetsuppgifter upp till 130 kV, inklusive AMS med isolerstångsmetoden. Vid 220 kV tillkommer vissa begränsningar, ex vis klättring längs stolpben och vid 420 kV även arbete vid riskområdets yttre gräns.

De högre begränsningsnivåerna 24 och 38 kV/m kräver att besvärade gnisturladdningar hanteras på lämpligt sätt och att man kan visa att gränsvärdet för den inre fältstyrkan (100 mV/m) inte överskrids. En möjlighet för medelhöga fält kan vara att använda en enklare E-fälts overall av den typ som togs fram gemensamt av Vattenfall, Ragnar Stålskog AB, Fristads AB och Arbesko AB. För de riktigt höga fältstyrkor som blir aktuella vid barhandsarbete är endast en komplett ledande dräkt ett fullgott alternativ.

Mätning av fältstyrkan kan vara ett alternativ i vissa situationer för att få bättre kunskap om faktiska exponeringsförhållanden. Det kan dock inte rekommenderas för annat än mycket speciella situationer då mätningar är tidsödande och resultatet lätt kan påverkas av fukt och av "främmande" ledande föremål i mätprobens närhet. De enkla tumregler som givits här i rapporten ger i flertalet fall ett helt acceptabelt underlag för att bedöma exponeringen.

5.4 Arbete i höga magnetiska fält

Rekommendationerna utgår från tre olika exponeringssituationer:

- Luftledning. Arbete nära en fas belastad med 1000 A

- Ställverk. Arbete nära en samlingsskena eller nära en skena i ett fack belastad med 3000 A
- Kabel. Arbete nära en 1-fas kabel belastad med 1000 A

Övriga förutsättningar

Avståndet till den närmaste fasen är kort i förhållande till avståndet till de övriga och magnetfältet kan därmed uppskattas m h a Biot-Savarts lag för endast en lång rak ledare.

Angivna avstånd till den strömförande ledaren är direkt proportionella mot strömstyrkan, ett annat värde på strömmen kan enkelt räknas om till annat avstånd.

Begränsning för magnetiska fält (μT)	Referens	Beräknat minimi-avstånd (m) vid	
		1 000 A	3 000 A
1 000	ICNIRP 2010, Reference level för centrala nervsystemet. EU förslag juni 2011, Orientation value. Ingen skadlig påverkan på kroppen. Förslag CEEMET. Lower action value. Gränsvärden för Sensory effects och Health effects skall ej kunna överskridas.	0,20	0,60
3 000	ICNIRP 2010. Sammanfattning av dosimetriska uppgifter för centrala nervsystemet utan extra säkerhetsfaktor, motsvarar Basic restriction.	0,07	0,20
4 444	ICNIRP 2010. Reference level för perifer nervsystemet.	0,05	0,14
13 320	EU förslag juni 2011. Action value. Gränsvärdet skall ej kunna överskridas. Förslag CEEMET. Action value för huvud och bål. Gränsvärdet för Health effects skall ej kunna överskridas.	0,02	0,05
54 000	Förslag CEEMET. Action value för lem-exponering. Gränsvärdet för Health effects skall ej kunna överskridas.	0,01	0,02

Tabell 34. Rekommendationer för arbete i höga magnetiska fält.

Kommentarer:

Man skall sträva efter att så långt som möjligt begränsa sin exponering för höga magnetiska fält, både vad det gäller nivå och varaktighet.

Arbete på luftledningarna och i ställverk.

Vid arbete utanför riskområdets yttre gräns, utgör inte angivna magnetfältsnivåer någon faktisk begränsning för arbetet. Detta innebär att det är endast vid Arbete Med Spänning och med den s k barhandsmetoden som magnetfält kan utgöra någon begränsning. Detta begränsar antalet situationer högst avsevärt.

Vid barhandsmetoden skall arbetssättet anpassas så att det är möjligt att upprätthålla ett minsta avstånd mellan huvud och strömförande ledare. Avståndet beror av önskad skyddsnivå och blir mellan 2 och 20 cm för friledningar. För högt belastade skenor i ställverk fås 5 – 60 cm. Det bör vara fullt möjligt att kunna upprätthålla dessa avstånd med de arbetsprocedurer som används idag, men det kommer troligen att krävas viss en skärpning av instruktionerna för arbetets utförande.

Angivna begränsningar för exponering av lemmar, 1 – 5 cm för friledningar och 2 – 14 cm för högt belastade skenor i ställverk, förhindrar möjligheten att greppa om ledare med händerna. För detta kommer det i stället att krävas ett kort isolerande verktyg, förslagsvis så kort att det normalt kan bäras i ett verktygsbälte. Även om vissa arbetsprocedurer kommer att behöva ändras på denna punkt, skall inte detta behöva innebära något större problem.

Arbete invid kabelförband

Ett önskat minimiavstånd på 2 - 20 cm mellan huvud och strömförande kabel skall inte behöva kräva några inskränkningar i arbetet, endast tydlig information via instruktioner och dylikt.

Begränsningen för lemexponering på 1 – 5 cm förhindrar möjligheten att lyfta och flytta en strömförande kabel direkt med händerna. Detta kan i stället lösas med en kort lyftstropp alternativt ett enkelt lyftverktyg. Även av denna anledning kan vissa arbetsinstruktioner behöva kompletteras.

6 Referenser

- 1 EUROPAPARLAMENTETS OCH RÅDETS DIREKTIV 2002/44/EG av den 25 juni 2002 om minimikrav för arbetstagares hälsa och säkerhet vid exponering för risker som har samband med fysikaliska agens (vibration) i arbetet (sextonde särdirektivet enligt artikel 16.1 i direktiv 89/391/EEG). Publicerad i Europeiska gemenskapernas officiella tidning 6.7.2002.
- 2 Vibrationer. Arbetsmiljöverkets föreskrifter om vibrationer samt allmänna råd om tillämpningen av föreskrifterna. AFS 2005:15.
- 3 EUROPAPARLAMENTETS OCH RÅDETS DIREKTIV 2003/10/EG av den 6 februari 2003 om minimikrav för arbetstagares hälsa och säkerhet vid exponering för risker som har samband med fysikaliska agens (buller) i arbetet (sjuttonde särdirektivet enligt artikel 16.1 i direktiv 89/391/EEG). Publicerad i Europeiska unionens officiella tidning 15.2.2003.
- 4 Buller. Arbetsmiljöverkets föreskrifter om buller samt allmänna råd om tillämpningen av föreskrifterna. AFS 2005:16.
- 5 Rådets direktiv 89/391/EEG av den 12 juni 1989 om åtgärder för att främja förbättringar av arbetstagarnas säkerhet och hälsa i arbetet. Publicerad i Europeiska gemenskapernas officiella tidning nr L 183, 29/06/1989.
- 6 Larsson, Anette och Olsson, Göran: Arbete i höga elektriska och magnetiska fält – Luftledning 70-400 kV. Elforsk rapport 09:99. Oktober 1999.
- 7 Larsson, Anette och Olsson, Göran: Arbete i höga elektriska och magnetiska fält – Ställverk 70-420 kV. Elforsk rapport 10:108, Maj 2010
- 8 Larsson, Anette och Olsson, Göran: Magnetfält i kabelmiljö. Elforsk rapport 10:109, September 2010
- 9 SS-EN 50 110-1. Utgåva 2. 2005-06-15. Skötsel av elektriska anläggningar.
- 10 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.
- 11 Holmström, Sture; Kemmlert, John; Grape, Ulf och Larsson, Anette: Möjligheter att reducera magnetfält. Teori och praktik. Elforsk rapport 00:31. 2000.
- 12 Holmström, Sture; Kemmlert, John; Larsson, Anette och Grape, Ulf: Konstruktioner för att erhålla låga magnetfält i distributionsanläggningar. Elforsk rapport 02:33. 2002.
- 13 Holmström, Sture; Grape, Ulf och Larsson, Anette: Nätstation med lågt magnetfält. Elforsk rapport 04:47. 2004.

- 14 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.
- 15 Rådets rekommendation av den 12 juli 1999 om begränsning av allmänhetens exponering för elektromagnetiska fält (0 Hz – 300 GHz). (1999/519/EG)
- 16 Statens strålskyddsinstituts allmänna råd om begränsning av allmänhetens exponering för elektromagnetiska fält; beslutade den 28 oktober 2002. SSI FS 2002:3.
- 17 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).
- 18 ICNIRP Guidelines. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz TO 100 kHz), inkl Erratum – 25.11.2010. Health Physics December 2010, Volume 99, Number 6.
- 19 Draft working document. Directive 2004/40/EC of the European parliament and of the council on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risk arising from physical agents (Electromagnetic fields) (18th individual directive within the meaning of article 16(1) of directive 89/391/EEC). Version 5/11/2010.
- 20 Proposal for a directive of the European parliament and of the council on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risk arising from physical agents (Electromagnetic fields) (18th individual directive within the meaning of article 16(1) of directive 89/391/EEC). Draft 02/03/2011.
- 21 Proposal for a directive of the European parliament and of the council on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risk arising from physical agents (Electromagnetic fields) (18th individual directive within the meaning of article 16(1) of directive 89/391/EEC). Brussels, XXX. [...](2011) XXX draft. Förslag från juni 2011.
- 22 Tillvägagångssätt för bedömning av arbetstagares exponering för elektromagnetiska fält. SS-EN50499. Utgåva 1, 2009-04-27.
- 23 Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risk arising from physical agents (Electromagnetic fields) (18th individual directive within the meaning of article 16(1) of directive 89/391/EEC). 2011/0152 (COD). Förslag från CEEMET Industrial Expert Group. January 26 2012.
- 24 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.

- 25 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.
- 26 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.
- 27 Dawson, Trewor W; Caputa, Kris and Stuchly, Maria: 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.
- 28 Larsson, Anette och Olsson, Göran: Gnisturladdningar och kontaktströmmar. *Elforsk rapport 07:36*. November 2007.
- 29 Korpinen, Leena H., Elovaara, Jarmo A and Kuisti, Harri A.: Evaluation of Current Densities and Total Contact Currents in Occupational Exposure at 400 kV Substations and Power Lines. *Bioelectromagnetics Vol 30*. 2009. pp 231-240
- 30 Korpinen, Leena H., Elovaara, Jarmo A. and Kuisti, Harri A.: Occupational Exposure to Electric Fields and Induced Currents Associated With 400 kV Substation Tasks From Different Service Platforms. *Bioelectromagnetics Vol 32*. 2011. pp79-83
- 31 Långsjö, T, Latva-Teikari, J, Elovaara, J and Korpinen, L: Model for neck when estimating exposure to electric fields at 400 kV substations. In Kostarakis, P (eds.) *Biological effects of EMFs*. 4th International Workshop. Crete. Greece 16-20 October 2006. Pp 376-382.
- 32 Deschamps, Francois, Mouychard, Christian and Peigne, Vincent: Exposure to Electric Field at Work Positions High Above Ground Level in High Voltage Substations. *EMF-ELF-2011: C-O-03*. 2nd Conference on EMF-ELF. Paris. March 24-25. 2011.
- 33 Doernemann, C: Experiences on Electric and magnetic Fields at Working Places on High Voltage Towers. *EMF-ELF-2011: C-O-07*. 2nd Conference on EMF-ELF. Paris. March 24-25. 2011.
- 34 Deschamps, Francois, Riquell, G, Spangenberg, Eric and Ostermann, Sabine: Exposure to Electric Field During Live-Line Working. *EMF-ELF-2011:C-O-02*. 2nd Conference on EMF-ELF. Paris. March 24-25. 2011.
- 35 IEC 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.
- 36 Dalziel; Charles F.: Electric shock hazard. *IEEE Spectrum* Feb 1972. pp 41-50.
- 37 *Transmission Line Reference Book*. 345 kV and Above. Second Edition. Prepared by Project UHV. 1982.

- 38 Effects of current on human beings and livestock – Part 1: General aspects. IEC TS 60479-1. Ed 4. 2005-07. Inkl Corr 1, oktober 2006.
- 39 Protection of workers from power frequency electric and magnetic fields. Occupational Safety and Health Series No 69. International Labour Organization 1994.
- 40 Schutz vor niederfrequenten elektrischen Feldern der Energieversorgung und anwendung. Berichte der Strahlenschutzkommission (SSK) des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Heft 7, 1997.
- 41 Reilly, J. Patrick: Applied Bioelectricity. From Electrical Stimulation to Electropathology. Springer – Verlag. 1998.
- 42 Haubrich, Hans-Jürgen, Dickers, Klaus und Lange, Gerhard: Influenzwirkung auf Personen und Fahrzeuge im elektrischen 50-Hz-Feld. Elektrizitätswirtschaft, Jg. 89. 1990. Heft 6. pp 280-286.
- 43 Maruvada, P Sarma and Hyltén-Cavallius, N: Capacitance calculations for some basic high voltage electrode configurations. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-94. No 5. Sep/oct 1975.

ELFORSK

SVENSKA ELFÖRETAGENS FORSKNINGS- OCH UTVECKLINGS - ELFORSK - AB

Elforsk AB, 101 53 Stockholm. Besöksadress: Olof Palmes Gata 31
Telefon: 08-677 25 30, Telefax: 08-677 25 35
www.elforsk.se

Filnamn: 12_45_rapport.docx
Katalog: G:\Gemensam\Rapporter\Elforsks_rapporter\201
2_original\12_45
Mall: H:_MSOfficeMallar\Normal.dotm
Rubrik:
Ämne:
Författare: Formiograf
Nyckelord:
Kommentarer: ELF500 v 1.0
2006-02-06
Datum: 2014-12-01 08:41:00
Version: 2
Senast sparad: 2014-12-01 08:41:00
Senast sparad av: KMO
Total redigeringstid: 2 minuter
Senast utskrivet: 2014-12-01 08:41:00
Vid senaste fullständiga utskrift
Antal sidor: 95
Antal ord: 27 147 (cirka)
Antal tecken: 143 885 (cirka)