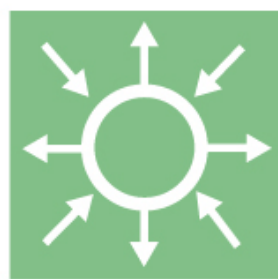


Gnisturladdningar och kontaktströmmar

Elforsk rapport 07:36



Anette Larsson och Göran Olsson

September 2007

ELFORSK

Gnisturladdningar och kontaktströmmar

Elforsk rapport 07:36

Förord

Föreliggande rapport har utförts inom Elforsks EMF-program. Programmet omfattar forskning och kunskapssammanställningar kring effekter av kraft-frekventa elektriska och magnetiska fält från elnät och elproduktions-anläggningar samt hur elektriska och magnetiska fält kan mätas, bedömas och begränsas.

Rapporten har utarbetats på Elforsks uppdrag av Anette Larsson Vattenfall Research and Development AB och Göran Olsson STRI AB.

Arbetet har finansierats av följande företag: Borlänge Energi AB, Borås Energi Nät AB, E.ON Sverige AB, E.ON Elnät Sverige AB, Energiverken i Halmstad AB, Falu Elnät AB, Fortum Distribution AB, Göteborg Energi AB, Jämtkraft AB, Luleå Energi Elnät AB, Lunds Energi Nät AB, Sundsvall Energi Elnät AB, Svenska Kraftnät, Tekniska Verken i Linköping AB, Umeå Energi Elnät AB, Vattenfall AB, Växjö Energi AB

Arbetet har initierats och följts av Svensk Energis EMF-grupp bestående av Eva Bergius, Svenska Kraftnät, Lennart Engström Vattenfall, Bengt Hanell Elforsk, Åke Sjödin Elforsk, Henry Söderman Fortum, Ulf Thorén E.ON, och Sven-Olof Lång Svensk Energi.

Stockholm maj 2007

Bengt Hanell

för Elforsk AB

Programområde Överföring och distribution

Sammanfattning

Gnisturladdningar och kontaktströmmar är beroende av det elektriska fältets storlek. För de förstnämnda finns ingen formell begränsning, men de kan ge upphov till obehag och smärta. För kontaktströmmar finns en begränsning på 1,0 mA för arbetstagare och 0,5 mA för allmänheten (< 2,5 kHz).

Det har diskuterats om det är dessa fenomen som i praktiken sätter gränsen för det elektriska fältet. Insatsvärdet för elektrisk fältstyrka är 10 kV/m för arbetstagare och 5 kV/m för allmänheten vid 50 Hz och motsvarande gränsvärde är 10 mA/m² respektive 2 mA/m². Det har på olika sätt visats att denna relation är konservativ och att sätta gränsvärden i vissa fall kan medge ett högre E-fält. Frågan är då: Vilken betydelse har gnisturladdningar och kontaktströmmar för den fältstyrka som kan accepteras i olika situationer?

Fyra huvudfall kan studeras:

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

Det kan visas att Fall 1 & 2 – uppladdningen av människa – varken kan ge några större kontaktströmmar eller allvarligare gnisturladdningar.

Fall 3 - kontaktström från ett uppladdat föremål (t ex ett fordon) och till en människa – kan beräknas under vissa antaganden. Vanligen kan den maximala strömmen beräknas och den verkliga, lägre, uppskattas. Inte heller detta fall skall behöva innebära några allvarligare problem.

Fall 4 – gnisturladdning mellan ett uppladdat föremål och en människa – kan möjligen orsaka problem. Mycket är gemensamt med det tredje fallet, som betydelsen av föremålets storlek och urladdning via däck och vägmateriäl. Mätningar med fordon på olika underlag visar att man inte i något fall får en uppladdningsspänning överstigande 50 % av det ostörda fältet.

Gnisturladdningar kan också drabba dem som arbetar i ställverk. Problemen är lättare att hantera än de som kan uppstå på allmänna platser. Vid uppställning av större fordon mm, bör platser med hög fältstyrka undvikas. Fasta föremål bör jordas och fordon förses lämpligen med en "släpande jord", dvs en kortare kätting som får släpa under fordonet.

Det kan konstateras att varken gnisturladdningar eller kontaktströmmar bör orsaka några större problem eller obehag i sådana miljöer som allmänheten normalt har tillträde till. Risken är större i ställverk och i liknande miljöer, men där kan problemen hanteras enklare genom användning av skor med halvledande sula och genom jordning av fordon och uppställda föremål.

Genom användning av lämpliga arbetskläder och genom att på olika sätt minska risken för uppladdning av fordon och föremål, ges det förutsättningar för att i vissa fall öka den högsta acceptabla fältstyrkan från 10 till 20 kV/m, om man kan visa att det korresponderande gränsvärdet på 10 mA/m² inducerad ström i kroppen inte överskrids.

Summary

Contact currents and spark discharges may occur between a person in an electric field and a conductive object. Contact currents are limited to 1.0 mA for occupational exposure and to 0.5 mA for the general public. For spark discharges, however, there are no formal restrictions but they can still result in unpleasant sensations and even to pain.

These two phenomena are previously well discussed in the literature and their relation to the electric field is well known. Their importance for the maximum acceptable electric field has also been discussed. The reference level at 50 Hz is 10 kV/m for occupational exposure and 5 kV/m for the general public, while the corresponding basic restrictions are 10 mA/m² respectively 2 mA/m². However, it has been demonstrated that humans could be exposed to higher fields levels without exceeding the basic restriction, if only the current density level is considered.

Four exposure cases can be studied:

- Contact currents from a charged person to ground.
- Spark discharges between a charged person and ground.
- Contact currents from a charged object to a person.
- Spark discharges between a charged object and a person.

It can be demonstrated that the two first cases – involving a charged person – neither can result in large contact currents nor more serious spark discharges.

The third case – contact current from a charged object like a vehicle and to a person – can be calculated with some simplifications. The maximum values can usually be calculated while the more realistic ones, generally lower, can often be estimated. Also this case should not normally result in any more serious problems.

The fourth case – spark discharges between a charged object and a person – can result in unpleasant sensations. The size of the object is one important factor and, in case of vehicles, the resistance of the tires and also the ground conditions. Measurements have shown that the maximum charging voltage will never exceed 50 % of the unperturbed electric field level.

Spark discharges can be a problem for people working in substations, but the problems are easier to handle than these occurring in public areas. Larger vehicles should not be parked in areas with high electric fields and fixed objects should be grounded. Vehicles can also be equipped with a chain for continuous grounding. Shoes with conductive soles are recommended for work in substations and other areas with high field levels.

In the specific case of restricted areas and occupational exposure, there are certain conditions when the maximum acceptable electric field can be increased from 10 kV/m to 20 kV/m. Measures must be taken to limit the capacitive charging of objects and humans and the basic restriction value of 10 mA/m² must not be exceeded.

Innehåll

1	Inledning	1
2	Litteraturöversikt	3
2.1	Strömtäthet	3
2.2	Begränsningar för gnisturladdningar och kontakt-strömmar.....	4
2.3	Hur människor reagerar på gnisturladdningar och kontaktströmmar	5
2.4	Mätning och beräkning av kontaktströmmar från människor	9
2.5	Beräkning och uppmätning av gnisturladdningar från människor	16
2.6	Mätning och beräkning av kontaktströmmar från större föremål.....	18
2.7	Beräkning och uppmätning av gnisturladdningar från större föremål.....	22
2.8	Induktion från 3-fas fält jämfört med från homogena fält.....	27
2.9	Andra effekter av gnisturladdningar och kontakt-strömmar	31
2.9.1	Hög strömtäthet orsakad av kontaktströmmar och tänkbara långtidseffekter	31
2.9.2	Påverkan på pacemakers	34
2.10	Påverkan av statiska fält	35
3	Pågående examensarbeten	38
3.1	Uppladdning av fordon.....	38
3.2	Kontaktströmmar i ett 400 kV:s ställverk	39
4	Verifierande experiment	41
4.1	Mätning av kontaktströmmar i ställverksmiljö	41
4.2	Mätningar av E-fält i ställverk	42
4.3	Experiment med ledande tyg	45
4.3.1	Ledande tyg, leverantörer och produkter	45
4.3.2	Mätning av dämpning av 50 Hz E-fält	46
5	Diskussion och slutsatser	50
6	Referenser	53

1 Inledning

En kropp i ett elektriskt fält får en laddningsfördelning på ytan. Fördelningen är beroende av fältets storlek och kroppens form och placering i fältet. Hos en människa som står upprätt i ett vertikalt tidsvarierande fält ger laddningsfördelningen upphov till en ström som flyter mellan hjässan och fötterna. Denna ström kan karakteriseras med en strömtäthet (mA/m^2). För denna strömtäthet finns begränsningar (gränsvärden) fastställda av bl a ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) [1] och EU till 2 mA/m^2 för allmänheten [2] och till 10 mA/m^2 för arbetstagare [3]. Den senare gruppen antas vara medveten om sin exponering och skall ha möjlighet att kunna begränsa denna. Strömtätheten i kroppen kan inte mätas direkt utan måste uppskattas från den yttre elektriska fältstyrkan. För denna storhet finns s k insatsvärden satta till 5 kV/m för allmänheten och till 10 kV/m för arbetstagare. Emellertid är inte relationen mellan insatsvärden och gränsvärden så enkel som man skulle kunna önska, utan innehåller ett antal komplicerande faktorer. Idag finns dock studier och även en blivande standard som visar på en mindre konservativ relation än de ovan nämnda; att 5 kV/m motsvaras av 2 mA/m^2 respektive att 10 kV/m motsvaras av 10 mA/m^2 . Detta skulle kunna ge möjlighet för att i vissa fall kunna acceptera högre fältstyrkor än de ovan nämnda.

Emellertid begränsas fältstyrkan även av s k gnisturladdningar och kontaktströmmar och för de senare finns också en formell begränsning på $0,5 \text{ mA}$ för allmänheten och $1,0 \text{ mA}$ för arbetstagare. Storleken av båda dessa fenomen kan uppskattas utifrån det elektriska fältets storlek och en bedömning av miljön runt den "drabbade". Med enkla beräkningar kan man visa att det är endast vid vissa speciella omständigheter som dessa fenomen når en sådan storlek att de blir besvärande eller möjligen överskrider satta begränsningar.

I den vidare framställningen beskrivs fyra huvudfall:

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

Möjligheten att skydda sig mot dessa fenomen diskuteras. Effekten vid de två första fallen, som innefattar en uppladdning av en person, 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 och kan även drabba allmänheten, vilket komplicerar frågan betydligt. 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.

Huvuddelen av rapporten utgörs av en översikt av den omfattande litteraturen på området; både äldre och senare. De senaste referenserna utgörs av ett par examensarbeten avslutade under 2006. Avskärmande tyg och kläder får en särskild beskrivning och avslutningsvis redovisas några mätningar av kontaktströmmar. Avsikten med dessa mätningar är framförallt att illustrera redan framtagna formler och uttryck och inte att på något sätt förbättra tidigare genomförda studier.

2 Litteraturöversikt

2.1 Strömtäthet

Med hjälp av anatomiska modeller och numeriska beräkningsrutiner har man kunnat visa att relationen mellan insats- och gränsvärde skiljer sig från den tidigare nämnda där 10 kV/m motsvaras av 10 mA/m². Arbeten vid University of Victoria med modellen UVic [4], [5] och vid NRPB (National Radiological Protection Board) i Storbritannien med modellerna NORMAN (NORmalized MAN) och NAOMI (aNAtOMIcal model) [6], [7] har båda visat på en mindre konservativ relation. Ett snarlikt resultat visas också i den blivande IEC-standard 62226-3-1 [8]. Nedan redovisas i korthet resultaten från dessa studier.

UVic: 10 kV/m, 50 Hz, medför ca 1,3 mA/m² i hjärnans grå substans, ca 1,9 mA/m² i ryggmärgen och ca 2,0 mA/m² i ögat, allt räknat som maxvärden av en medelvärdesbildning över 1 cm². Medelvärdesberäkningen har genomförts med den s k T-metoden, vilket innebär att beräkningspunkter i randzonen mot annat organ uppvisar något för låga värden. Vid en motsvarande beräkning enligt den s k F-metoden, kan randpunkterna få för höga värden om angränsande organ har en högre konduktivitet. För hjärnan och ryggmärgen märks detta tydligt då randpunkterna påverkas av den höga strömtätheten i cerebrospinalvätskan, som har ca 20 gånger högre konduktivitet. Med F-metoden fås 4,1 mA/m² i hjärnans grå substans, ca 3,6 mA/m² i ryggmärgen och ca 2,0 mA/m² i ögat.

NORMAN & NAOMI: 10 kV/m, 50 Hz, medför ca 1,84 mA/m² i hjärnan och ryggmärgen och ca 2,17 mA/m² i ögats näthinna, allt räknat som maxvärden av en medelvärdesbildning över 1 cm².

IEC Draft 62226-3-1 [8]: 10 kV/m, 50 Hz, medför ca 2,44 mA/m² genom ett tvärsnitt i halsen. Strömtätheten i ryggmärgen är lägre eftersom dess konduktivitet är lägre än medelvärdet över hela halstvärsnittet.

Sammanfattningsvis kan man konstatera att kravet på en högsta strömtäthet av 10 mA/m² medger en betydligt högre fältstyrka än 10 kV/m. Ca 40 kV/m torde i *detta* avseende vara den högsta acceptabla exponeringen. En så hög fältstyrka medför givetvis andra komplikationer. Människokroppen stör det elektriska fältet och fältet blir lokalt kraftigt förstärkt. På hjässan av en upprätt stående person fås en sådan lokal förstärkning av 17 – 18 gånger, vilket innebär att vid ett homogent fält på 10 kV/m fås ett lokalt fält på 170 – 180 kV/m. Ett homogent fält på 40 kV/m medför då givetvis en orealistisk hög nivå, men ett homogent och ostört fält på 20 – 25 kV/m kan möjligen accepteras av de flesta vid kortvarig exponering i arbetslivet.

2.2 Begränsningar för gnisturladdningar och kontaktströmmar

Emellertid är inte insatsvärdena bara satta för att begränsa strömtätheten i kroppen utan även för att begränsa s k kontaktströmmar och gnisturladdningar samt för att skydda mot påverkan på medicinska implantat som pacemakers mm. Se följande stycke ur ICNIRP Guidelines [1]:

"In the frequency range up to 1 kHz, the general public reference levels for electric fields are one-half of the values set for occupational exposure. The value of 10 kV/m for a 50-Hz or 8.3 kV/m for a 60-Hz occupational exposure includes a sufficient safety margin to prevent stimulation effects from contact currents under all possible conditions. Half of this value was chosen for the general public reference levels, i.e., 5 kV/m for 50 Hz or 4.2 kV/m for 60 Hz, to prevent adverse indirect effects for more than 90 % of exposed individuals."

Om det inte finns risk för gnisturladdningar eller kontaktströmmar, ger ICNIRP möjlighet att fördubbla den högsta elektriska fältstyrkan från 10 till 20 kV/m [1], se nedan:

"For the specific case of occupational exposures at frequencies up to 100 kHz, the derived electric fields can be increased by a factor of 2 under conditions in which adverse indirect effects from contact with electrically charged conductors can be excluded."

Gnisturladdningar och kontaktströmmar kan uppkomma när en person, som befinner sig i elektriskt fält och är isolerad från jord, vidrör ett jordat föremål. Gnisturladdningen är en enstaka och kortvarig puls, möjligen återkommande någon gång per period. Kontaktströmmen, däremot, är en kontinuerlig ström med samma frekvens som det elektriska fältet.

För kontaktströmmar finns begränsningar satta av både ICNIRP och EU. De begränsas i frekvensområdet upp till 2,5 kHz för arbetstagare till 1,0 mA och för allmänheten till 0,5 mA. Skillnaden mellan dessa båda grupper motiveras av att kvinnor och framförallt barn är mer känsliga för kontaktströmmar, se nedan:

"Since the threshold contact currents that elicit biological responses in children and adult women are approximately one-half and two-thirds, respectively of those for adult men, the reference levels for contact current for the general public are set lower by a factor of 2 than the values for occupational exposure."

För gnisturladdningar finns däremot ingen formell begränsning, men de kan ändå i vissa fall vara besvärande.

Det kan i sammanhanget vara värt att nämna något om motsvarande begränsningar inom den del av världen som regleras av IEEE-standard. Detta är framförallt en fråga som avhandlas i IEEE Std C95.6:2002 "IEEE standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electromagnetic

Fields, 0-3 kHz" [9]. I standarden talas om *General Public* och *Controlled Environment*. Den senare miljön är endast åtkomlig för personer som är medvetna om att de exponeras. Detta kan vara tillgodosett genom viss anställning eller genom att personerna har informerats via skyltar. I en Controlled Environment är personalen tränad att minska risken för smärtsamma gnisturladdningar. Ett stadigt tag i ett föremål (Grasp) förväntas ge mindre obehag än en lätt vidröring (Touch).

För frekvensområdet 0 – 3 kHz föreskrivs följande i IEEE Std C95.6:2002:

Exponeringssituation	General public (mA, rms)	Controlled Environment (mA, rms)
Båda fötterna	2,70	6,0
Var fot	1,35	3,0
Kontakt, stadig (grasp)	-	3,0
Kontakt, lätt (touch)	0,50	1,5

Tabell 1. Begränsningar för kontaktströmmar enligt IEEE C95.6:2002 [9].

2.3 Hur människor reagerar på gnisturladdningar och kontaktströmmar

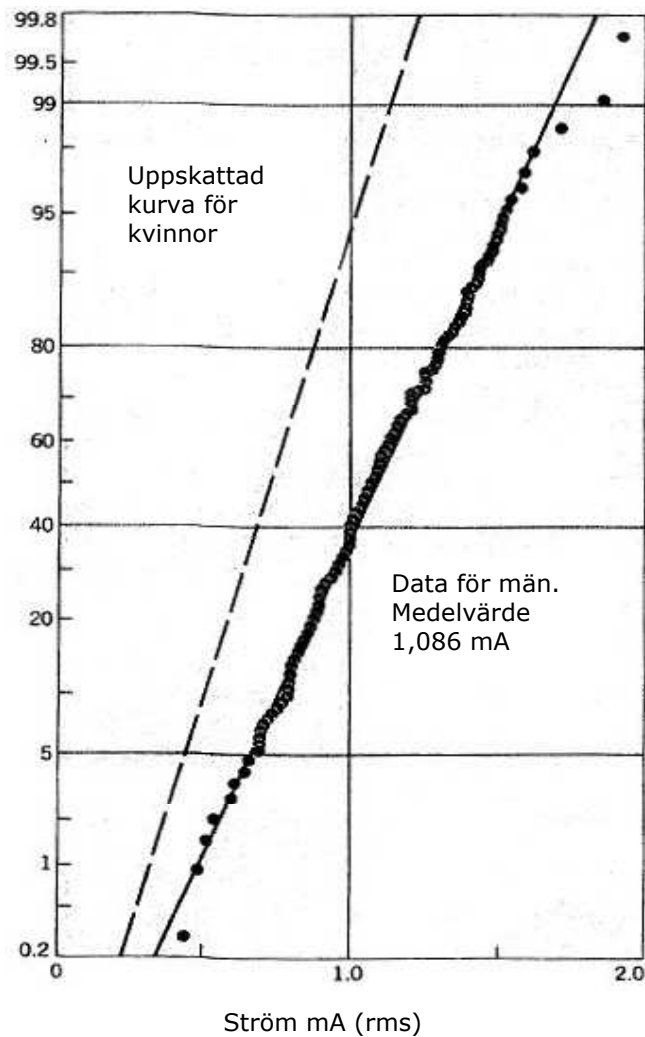
De begränsningar för kontaktströmmar som anges av ICNIRP och IEEE är ett resultat av omfattande volontärförsök som bedrivits åtminstone sedan 1930-talet. I en artikel av Charles F. Dalziel [10] redovisas försök från 1933 för att bestämma gränsen för förnimmelse eller perception för en kontaktström, d v s 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 1, 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. Dessa siffror skall ställas mot ICNIRPs ambition att skydda 90 % av arbetstagarna respektive allmänheten och det är uppenbart att man därvidlag inte nått riktigt ända fram. Ett antal av dem som exponeras som arbetstagare kommer att känna av en kontaktström på 1,0 mA och likaså kommer en del av barnen märka 0,5 mA.

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 skall kunna släppa greppet om ett strömförande föremål. För 134 män uppmättes medianvärdet till 16 mA och 0,5 percentilen till 9 mA. Motsvarande värden för de 28 studerade kvinnorna 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) [11] och i IEC-standardens TS 60479-1

Effects of current on human beings and livestock – Part 1: General aspects, utgiven 2005 [12]. Från den senare skriften har Figur 2 reproducerats. Motsvarande uppgifter har också publicerats av ILO (International Labour Organization) 1994 [13], se Tabell 2 nedan, och av SSK (Strahlenschutzkommission) 1997 [14].

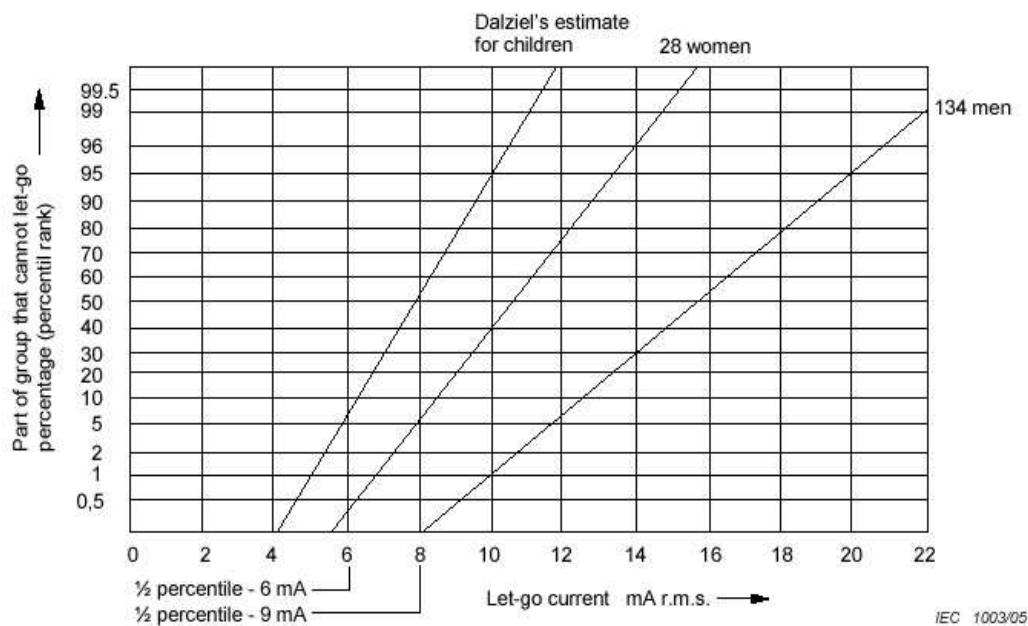
Percentil (%)



Figur 1. Gränsen för förnimmelse (perception) för kontaktström. Efter Dalziel 1972 [10].

De av Dalziel bestämda gränserna för förnimmelse och varaktig muskelkramp bekräftas i en studie av Sweeney [15]. Han utgår från tröskelvärdet för exitering av 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 som högst. 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



Figur 2. Gränsen för varaktig muskelkramp (Let-Go) för kontaktström. Efter IEC 60479-1 [12].

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 nivån) 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 med andra ord mycket god!

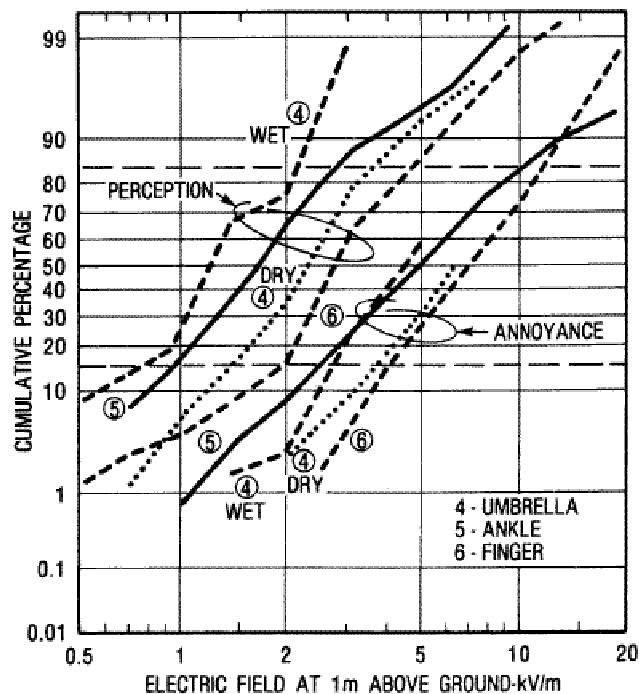
Även de kortvariga gnisturladdningarna har beskrivits utförligt i litteraturen. I EPRI:s skrift från 1982 [11] ges en översikt av en serie försök för att bestämma gränserna för förnimmelse och obehag vid gnisturladdningar. Man har i detta fall studerat påverkan vid kontakt via finger, via ankeln mot jord och mellan tummen och metallstången i ett paraply. Vädret har stor betydelse, torr väderlek höjer känslighetströskeln med ungefär en faktor 2. I Figur 3 nedan, som återges från EPRI, 1982, bedöms urladdningarna efter den ostörda elektriska fältstyrkan på 1 meters höjd, d v s det fält som laddar upp människan eller paraplyet.

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 2. Känslighet för kontaktströmmar. Efter ILO 1994 [13].



Figur 3. Gränserna för förnimmelse (perception) och obehag vid gnisturladdningar. Återgiven från EPRI 1982 [11].

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 3. Känslighet för gnisturladdningar. Omarbetad efter ILO 1994 [13].

Kontakt med större föremål medför kraftigare påverkan eftersom den laddningsuppsamlade ytan ökar. Likaså påverkas upplevelsen av hudens resistans. Ett barn med tunt skinn i 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 3, som är en omarbetning efter ILO 1994 [13].

2.4 Mätning och beräkning av 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 [11] och av Vereinigte Elektrizitätswerke Westfalen (VEW) [16]. 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 laddningsuppsamlande 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 styrkan 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:

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

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

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

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 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 $14,3 \mu\text{A} / \text{kV/m}$ [16]. Vid $E = 10 \text{ kV/m}$ fås därmed $143 \mu\text{A}$. Skillnaden mellan de två studierna är uppenbarligen mycket liten.

Dessa resultat kan också jämföras med beräkningar som gjorts med UVic-modellen ($h = 1,77$ m) [17].

Figur 4 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 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 μA vid 1 kV/m och 60 Hz. Vid 50 Hz fås därmed $50/60 \times 17,6 \mu\text{A} \approx 147 \mu\text{A}$. Även detta passar väl in i bilden!

Uttrycket [2] ovan är en förenkling av det generella uttrycket för strömmen genom en vertikal cylinder med höjden h , radien r och på avståndet d ovan ett jordat plan.

$$I_c = 2 \times \pi^2 \times \epsilon_0 \times f \times h^2 \times E / \ln\{(h / r) \times [(4d + h) / (4d + 3h)]^{1/2}\} \quad [3]$$

Med $h / r = 12$ fås "mänskliga proportioner" och med $d = 0$ fås ett fall som motsvarar beräkningarna ovan.

Med $h = 1,77 \text{ m}$, $r = 0,148 \text{ m}$, $f = 50 \text{ Hz}$, $E = 10\,000 \text{ V/m}$ och $d = 0$ fås att $I_c \approx 142 \mu\text{A}$.

Kroppslängden (h) är den mest kritiska parametern, men även cylinderradien, eller rättare sagt hur kraftig man är, påverkar resultatet. Om radien ändras med $\pm 25 \%$ i ovanstående exempel, ändras strömmen med ca $\pm 13 \%$.

Denna beräknade ström är den maximala som kan uppkomma när övergångsresistansen mellan fötterna och jord är lika med noll. Så är i praktiken givetvis inte fallet. Skor ökar resistansen avsevärt, men även med bara fötter fås vanligen en resistans på 20Ω och i de flesta fall betydligt mer. Torr mark medför en övergångsresistans på flera $\text{k}\Omega$.

Resistansen mellan de två fotsulorna och jord kan enligt Reilly [15] beräknas enligt följande:

$$R = 1/2 \times (R_f + R_M) \quad [4]$$

$$\text{där } R_f = \rho / 4 \times r \quad [5]$$

och

$$R_M = \rho / 4 \times \pi \times d \quad [6]$$

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 $r = 0,08 \text{ m}$, $d = 0,5 \text{ m}$ och $\rho = 50 \Omega\text{m}$ fås att $R = 82 \Omega$.

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 har studerat inverkan av sulornas tjocklek och funnit att strömmen till jord då reduceras med en term:

$$26,1 \times 10^{-22} \times h^3 \times f \times E / C, \quad [7]$$

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 reduceras med ca 1/3-del.

Inverkan av skor på totalströmmen till jord har också studerats i ett examensarbete av Johanna Fracke och Jenny Åke [18]. Man har då mätt det elektriska fältet i marknivå och totalströmmen till jord. Mätningar har gjorts under en kraftledning, med och utan gummistövlar och med stövlar i ett 400 kV ställverk.

Under ledningen, vid $E = 1,84$ kV/m, uppmättes $18,2 \mu\text{A}$ utan stövlar och $15,6 \mu\text{A}$ med stövlar, en minskning med ca 15 %. I ställverket uppmättes $147,8 \mu\text{A}$ vid ett fält av $17,94$ kV/m mätt i marknivå.

Försökspersonen var i detta fall 1,60 m lång och beräknat med uttrycket från EPRI fås $I_c = 9,0 \times 10^{-11} \times 1,6^2 \times 50 \times 1840 \approx 21 \mu\text{A}$ under ledningen och utan skor. I ställverket fås $I_c = 9,0 \times 10^{-11} \times 1,6^2 \times 50 \times 17940 \approx 207 \mu\text{A}$ (utan skor), med skor skall enligt EPRI strömmen minska med 1/3, d v s till ca $138 \mu\text{A}$.

Överstämelsen mellan mätta värden och beräknade enligt EPRI är förhållandevis god. Skillnader på 10 – 15 % måste i detta sammanhang anses vara acceptabla.

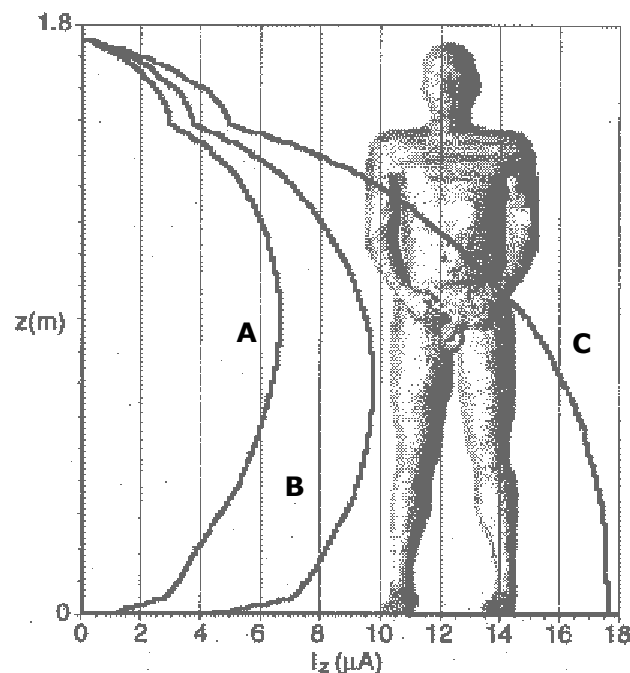
Av Figur 4, kurva C, kan man förstå att strömmen genom ett visst horisontellt tvärsnitt genom kroppen är en bråkdel av den totala strömmen till jord. För fallet ovan (en människa som har fötterna i kontakt med marken och har armarna längs sidorna) redovisar EPRI ett uttryck för att beräkna strömmen genom ett godtyckligt horisontellt snitt på höjden P [11]:

$$I(P/h) = 9,0 \times 10^{-11} \times h^2 \times f \times E \times f_1(P/h) \quad [8]$$

där funktionen $f_1(P/h)$ visas i Figur 5 och P = höjden ovan mark för snittet.

För hjässans topp är $f_1 = 0$ (ingen ström) och för fotsulorna 1 (full ström till jord). Med $E = 10$ kV/m, $f = 60$ Hz, $h = 1,77$ m och $P = 1$ m fås att $f_1 = 0,85$ och därmed att $I = 0,85 \times 16,9 \approx 144 \mu\text{A}$.

Detta kan jämföras med Figur 4 som för motsvarande snitt ger ca $150 \mu\text{A}$ vid 10 kV/m (I_z = strömmen på höjden z). Överensstämmelsen är även här god.



Figur 4. Den totala vertikala strömmen till jord för modellen UVic vid 1 kV/m, 60 Hz. Återgiven efter [17].

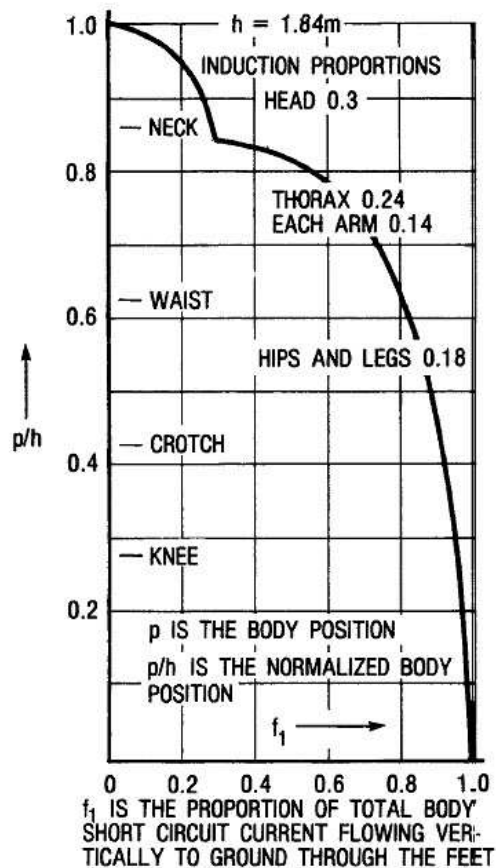
Kurva A visar strömmen med modellen på oändligt avstånd ovan ett jordat plan.

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.

I detta sammanhang bör man också nämna och kommentera en av de tidigast publicerade illustrationerna av strömtätheten hos en människa exponerad för ett vertikalt E-fält. Redan 1980 visade Kaune och Phillips hur det elektriska fältet påverkas av kroppsformen och hur stor strömtätheten är i olika horisontella snitt av människokroppen [19]. Se Figur 6. (I original visar den välkända figuren även en gris och råtta som båda exponeras för samma fält.) Figuren har reproducerats i ILO 1994 [13] och det finns också en hänvisning till den här artikeln från ICNIRP Guidelines [1].

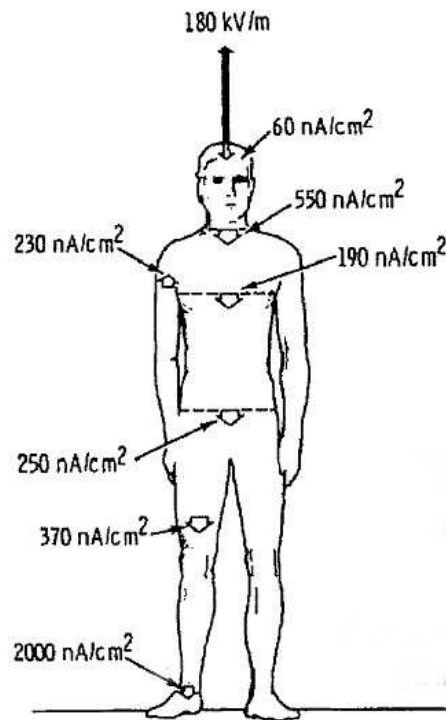
Totalström och strömtäthet har beräknats för fem horisontella snitt. Det skall dock betonas att strömtätheten beräknats för en homogen kropp med konstant konduktivitet. Beräkningarna är genomförda med en 1,7 m lång person och med ett homogent och vertikalt E-fält av 10 kV/m, 60 Hz. I Tabell 4 nedan återges en del av de redovisade beräkningsresultaten.



Figur 5. f_1 som funktion av P/h . Efter EPRI 1982 [11].

En jämförelse med motsvarande uppgifter från UVic (Figur 4) och från EPRI (Figur 5) visar på stora likheter. Totalströmmen är i samma storleksordning. Med modellen UVic fås $176 \mu\text{A}$ och med Kaune och Phillips' modell $160 \mu\text{A}$ vid 10 kV/m och 60 Hz . UVic är emellertid $1,77 \text{ m}$ lång och den senare $1,70 \text{ m}$. Om totalströmmen antas vara proportionell mot kroppslängden i kvadrat, fås med Kaune och Phillips' modell ca $173 \mu\text{A}$. Med EPRI:s empiriskt framtagna uttryck fås med samma indata ca $169 \mu\text{A}$.

Även totalströmmen genom olika snitt visar god överensstämmelse. I Kaune och Phillips' modell fås $47 \mu\text{A}$ genom halsen. Med den något längre UVic fås $48 - 49 \mu\text{A}$ och med EPRI-modellen fås ca $0,28 \times 169 \mu\text{A} \approx 47 \mu\text{A}$.



Figur 6. Strömtätheten i olika snitt genom kroppen vid $E = 10 \text{ kV/m}$, 60 Hz. Återgiven efter Kaune och Phillips 1980 [19].

Kroppsdelen	Mätsektionens höjd i cm ovan mark	Vertikal totalström genom den aktuella ytan (μA)	Ytans storlek (cm^2)	Strömtäthet (nA/cm^2) Vid 10 kV/m , 60 Hz
Halsen	144 (85 % av kroppslängden)	47	85	550
Bröstat	125 (73 %)	120	630	190
Midjan (bäckenet)	91 (53 %)	130	540	250
Låret (båda)	57 (34 %)	146	400	370
Fotleden (båda)	6 (3,5 %)	156	80	2000
Fotsulorna (från båda)	0	160		

Tabell 4. Totalström och strömtäthet efter Kaune och Phillips 1980 [19].

Uppgifter av det här slaget finns också i den blivande IEC-standard 62226-3-1 [8]. 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 halstvärnsnittet på $35 \mu\text{A}$ och en totalström till jord på $134 \mu\text{A}$. Vid 60 Hz ökar strömmen med en faktor 1,20 och då fås $42 \mu\text{A}$ respektive $161 \mu\text{A}$.

Sammanfattningsvis kan man konstatera att:

- För gruppen Allmänheten skall kontaktströmmarna begränsas till 0,5 mA och för den grupp som exponeras som arbetstagare, skall de begränsas till 1,0 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 [20].
- Det finns ett antal av varandra 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 $h = 2,0$ m fås vid 10 kV/m, 50 Hz, maximalt 180 μ A.
- Kontaktströmmar utgör i praktiken ingen begränsning för det högsta acceptabla elektriska fältet. För Allmänheten (vid $E \leq 10$ kV/m) fås maximalt 0,18 mA och för Arbetstagare maximalt (vid $E \leq 20$ kV/m) 0,36 mA, d v s väl under gränserna 0,5 respektive 1,0 mA.
- De maximala kontaktströmmarna, 0,18 och 0,36 mA, motsvarar gränserna (ca 0,2 percentilen) för förnimmelse eller perception vid kontakt via ett finger för allmänheten respektive arbetstagare.

2.5 Beräkning och uppmätning av 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 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 [11] som:

$$U_c = I_c / \omega C, \quad [9]$$

där I_c är strömmen till jord, se [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; $E = 20$ kV/m och $C = 150$ pF fås att:

$I_c = 0,36$ mA och att $U_c = 7,6$ kV.

Mätningar vid EPRI [11], med ett flertal personer och utförd vid olika väderlek, har visat att den maximala spänningen vid ett torrt och isolerande underlag kan uppgå till:

$$U_c = 0,42 \times E \quad [10]$$

Där 0,42 är en empiriskt funnen konstant. Med $E = 20$ kV/m fås 8,4 kV, vilket stämmer rimligt väl med ovanstående 7,6 kV.

Även VEW [16] har utfört mätningar av den maximala spänningen (med isolerande underlag) och med 111 försökspersoner funnit att:

$$U_c = 0,33 \times E \quad [11]$$

Där 0,33 är en empiriskt funnen konstant. I praktiken är inte skor och underlag fullständigt isolerande och därför når endast i undantagsfall spänningen upp i dessa förhållandevis höga nivåer. Mätningar vid EPRI [11], med ett antal försökspersoner och vid olika väderlek, har visat att spänningen U_c i praktiken kan variera mellan 0 kV och:

$$U_c = 0,3 \times E \quad [12]$$

Vilket med $E = 20$ kV/m ger maximalt 6 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:

För allmänheten med $E \leq 10$ kV/m fås: $U_c = 3,8$ kV

För arbetstagare med $E \leq 20$ kV/m fås: $U_c = 7,6$ kV

I praktiken blir spänningen i allmänhet lägre p g a av resistiva förlustströmmar via skosulorna till jord.

- Ovanstående maximala spänningar motsvarar ungefär 50 %-värdet för obehag för barn respektive män.

2.6 Mätning och beräkning av 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 $9,0 \times 10^{-11}$ är en funktion av kroppens laddningsuppsamlade yta. Detta innebär givetvis att ett föremål med större yta, bör ge upphov till en större ström.

Enligt EPRI [11] gäller allmänt att den inducerande strömmen i ett föremål nära jord kan tecknas:

$$I_c = j \times \omega \times \epsilon \times E \times S, \text{ där} \quad [13]$$

$\epsilon \approx 1 \times 10^{-9} / 36 \pi$ 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), bredd (B) och höjd ovan mark (H): 6,0; 2,5; 2,5 m

Med beteckningar enligt figur 8.8.2 i [11] (återgiven i denna rapport som Figur 7) fås att: $A / B = 2,4$ och att $H / B = 1,0$ och därmed fås ur figuren att $S / (A \times B) \approx 5,0$.

$$S = 5,0 \times 6,0 \times 2,5 = 180 \text{ m}^2.$$

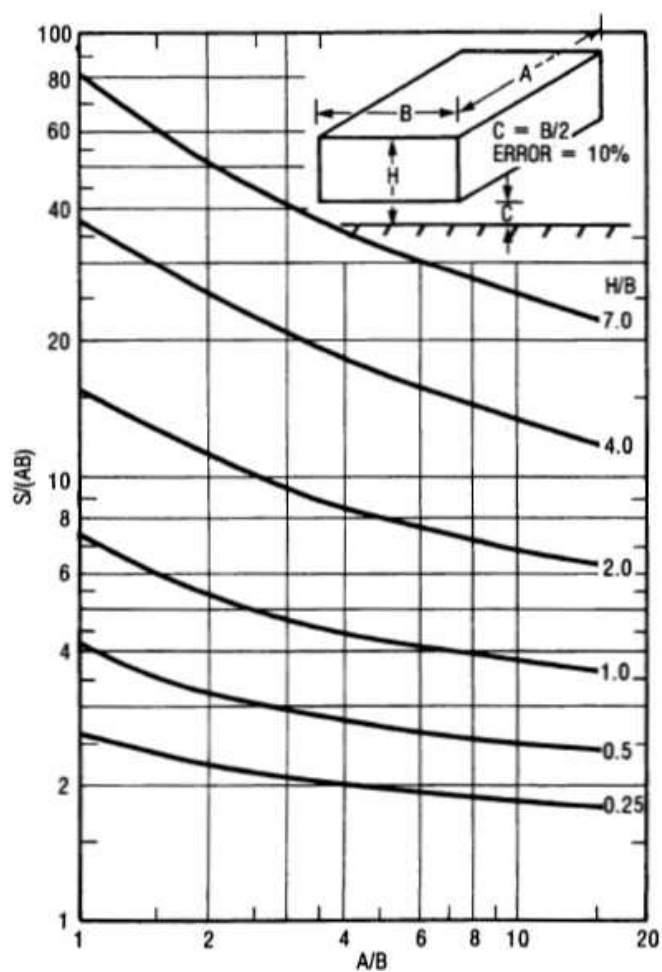
Strömmen tecknas som:

$$I_c = j \times \omega \times \epsilon \times E \times S \quad [14]$$

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

$$I_c = 5 \text{ mA}.$$

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



Figur 7. Kurvskara för beräkning av den ekvivalenta ytan S . Återgiven efter EPRI 1982 [11].

EPRI har genomfört beräkningar och mätningar med en lång rad olika fordon, både personbilar och större fordon som lastbilar och bussar. I Tabell 5 ges en sammanfattning av EPRI:s resultat:

Föremål	Maximal ström (mA) vid E = 10 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 5. Induktion i olika föremål. Återgiven efter EPRI 1982 [11].

En jämförelse med Tabell 5 visar att den inducerade strömmen i standard-containern närmast motsvarar den från en större tankbil.

EPRI:s "Reference Book" från 1982 [11] redovisas en jämförelse mellan beräknad och uppmätt ström från en personbil. Mätningen gav 0,79 – 0,83 mA vid 9 kV/m, 60 Hz, beroende på graden av isolation mellan bilens däck och jord.

Beräkningen har gjorts på samma sätt som för rätklocket ovan och med mått enligt nedan:

$$A = 4,6 \text{ m} \quad B = 1,78 \text{ m}$$

$$H = 1,08 \text{ m (medelhöjd med hänsyn till motorhuv och bagagerum)}$$

$$A / B = 2,6 \quad H / B = 0,61$$

Genom interpolation i Figur 7 fås att $S / (A \times B) \approx 3,25$

$$S \approx 3,25 \times 4,6 \times 1,78 \approx 26,6 \text{ m}^2$$

$$I_c = j \times \omega \times \epsilon \times E \times S \text{ och } \omega = 2 \times \pi \times 60 ; \epsilon \approx 10^{-9} / 36 \pi ; E = 9\,000 \text{ V/m}$$

$$I_c \approx (2 \times \pi \times 60 \times 10^{-9} \times 9\,000 \times 26,6) / 36 \times \pi \approx 0,8 \text{ mA}$$

Således en mycket god överensstämmelse med det beräknade värdet.

Det har ovan redan antytts att isolationen mellan fordon och underlag är avgörande för storleken av den uppladdningsström som kan förekomma i

praktiken. EPRI [11] 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, 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.

VEW har varit verksamma även inom detta område och bl a kontrollerat ett stort antal däck för personbilar, bussar och lastbilar [16]:

Personbil: 22 M Ω (Min – max: 100 k Ω - 350 M Ω)

Lastbil/buss: 240 k Ω (Min – max: 6 k Ω - 870 k Ω)

Den betydligt lägre resistansen för de tyngre fordonen beror på att deras kraftigare däck är uppbyggda med en stålarmring (cord) i sidorna. Däcken för personbilar har textilcord i sidorna och textil- eller stålcord 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 = $L \times B + 2 \times H \times (L + B)$ [15]

E_0 = storleken av det ostörda fältet

$$I_C (\mu A) = 3,3 \times A_0 \times E_0 \quad (\text{vid } 50 \text{ Hz}) \quad [16]$$

Där 3,3 är en empiriskt funnen konstant. För jämförelse med EPRIs exempel ovan, som resulterade i 0,8 mA vid 9 kV/m och 60 Hz, upprepas beräkningen med samma indata.

$$L = 4,6 \text{ m} \quad B = 1,78 \text{ m}$$

$$H = 1,08 \text{ m} \text{ (medelhöjd med hänsyn till motorhuv och bagagerum)}$$

$$A_0 = 4,6 \times 1,78 + 2 \times 1,08 \times (4,6 + 1,78) \approx 22,0 \text{ m}^2$$

$$I_C \approx 3,3 \times 22,0 \times 9 \approx 653 \mu A \text{ (vid } 50 \text{ Hz).}$$

Vid 60 Hz fås 20 % högre ström d v s $1,2 \times 653 \approx 0,78 \text{ mA}$.

Skillnaden mellan de två metoderna är i detta exempel bara ca 2 %, d v s en högst rimlig skillnad vid den här typen av beräkning.

Avslutningsvis ges ett exempel för att visa den maximala kontaktströmmen från en stor lastbil parkerad parallellt med och strax utanför ytterfasen på en 400 kV kraftledning. Bilens medelhöjd antas vara 4,0 m och medelfältstyrkan antas vara 8 kV/m. Inga läckströmmar via däck:

$L = 24 \text{ m}$, $B = 2,5 \text{ m}$ och $H = 4 \text{ m}$.

$$A_0 = 24 \times 2,5 + 2 \times 4 \times (24 + 2,5) = 272 \text{ m}^2$$

$$I_C = 3,3 \times 272 \times 8 \approx 7,2 \text{ mA}$$

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 kommer gränsen för förnimmelse (perception) att passeras för ca 20 % av männen och för 50 % av kvinnorna.
- Vid maximal uppladdning av en större lastbil under en 400 kV kraftledning passeras gränsen för varaktig muskelkramp (Let-Go) vid kontakt för 1 % av kvinnorna och 30 % av barnen.

2.7 Beräkning och uppmätning av 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 [11] 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 [16]. Man har där funnit att kapacitansen är proportionell mot fordonets yta enligt uttrycket:

$$C_E \text{ (pF)} = 54 \times L \times B \quad [17]$$

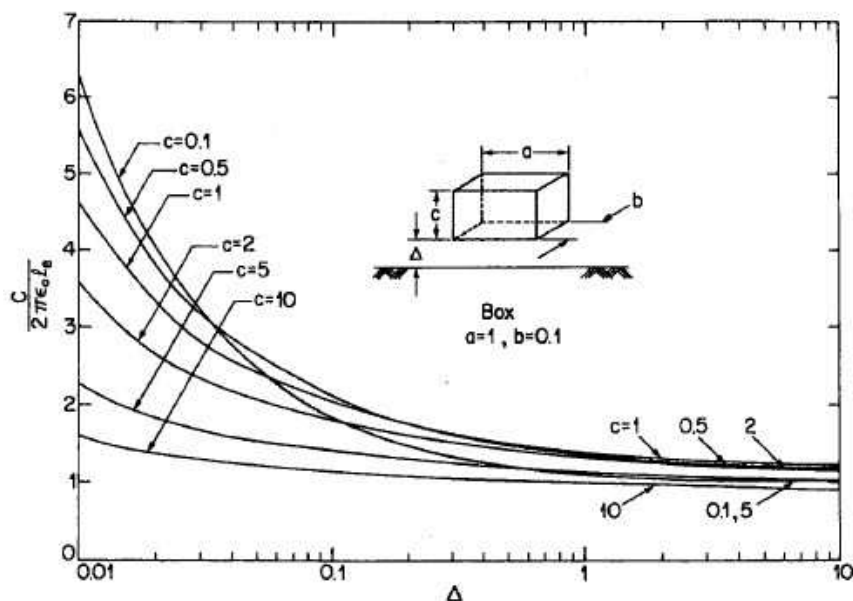
För en personbil med måtten $L = 4,5$ m och $B = 1,8$ m fås att $C_E \approx 440$ pF och för en buss med måtten $L = 10,5$ och $B = 2,5$ m fås att $C_E \approx 1400$ pF. Dessa siffror är generellt lägre än de EPRI redovisar och det är svårt att med säkerhet förklara skillnaden. Siffrorna från EPRI ges 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 [21] 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 $a = a' = 1,0$.

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



Figur 8. Normaliserade kapacitanser för en låda med $a = 1$ och $b = 0,1$. Efter Maruvada och Hyltén-Cavallius [21]. Observera att c och Δ i figuren skall läsas som c' och Δ' .

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

l_e = ekvivalenta längden definierad som $l_e = (a + b + c) / 3$

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

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

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

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

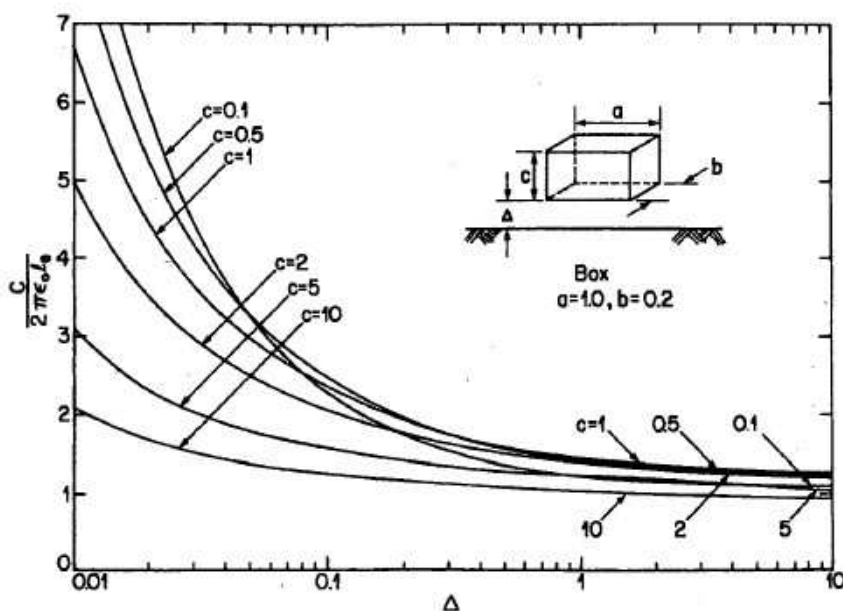
$l_e = (4,5 + 1,8 + 0,88) / 3 \approx 2,39$

Då $b / a = 0,4$ används Figur 10 och då fås att $C / 2 \pi \epsilon_0 l_e \approx 5,3$, dvs att

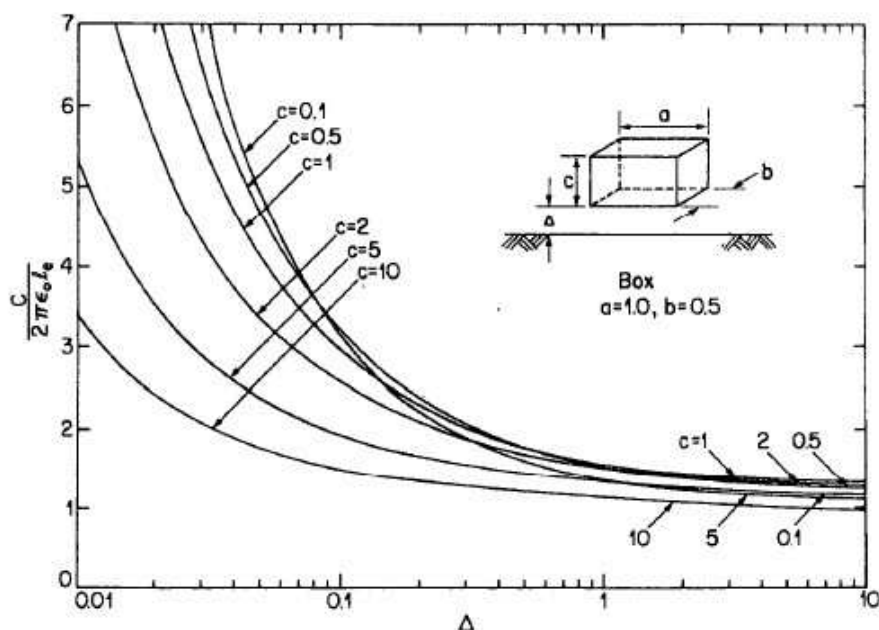
$C \approx 5,3 \times 2 \pi \times 10^{-9} \times 2,39 / 36 \pi \approx 704$ pF

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 10 att $C / 2 \pi \epsilon_0 l_e \approx 6,5$ och därmed att $C \approx 863$ pF.

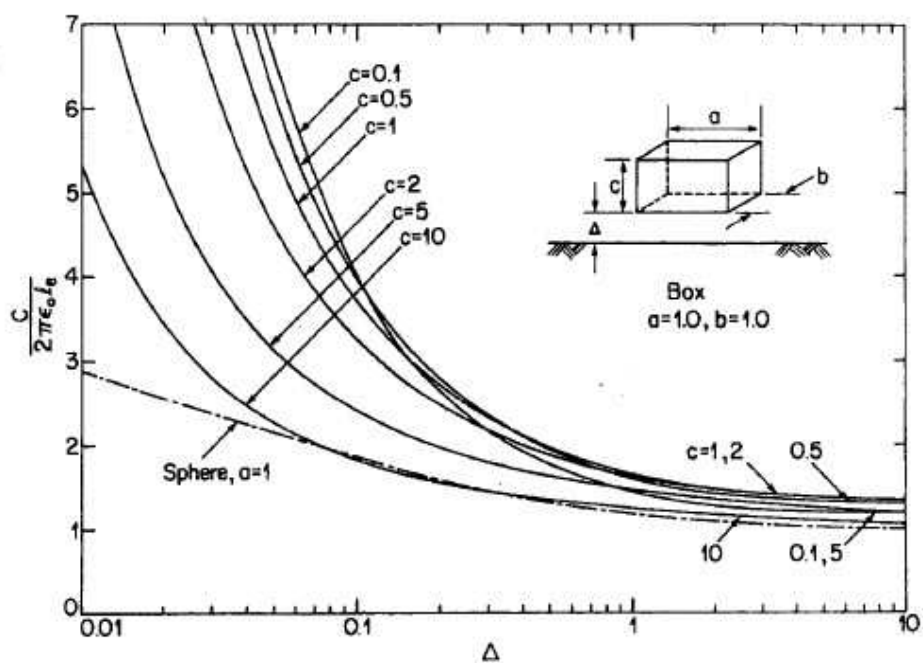
Detta visar att det med enkla metoder går att beräkna kapacitansen mellan ett mindre fordon och jord.



Figur 9. Normaliserade kapacitanser för en låda med $a = 1$ och $b = 0,2$. Efter Maruvada och Hyltén-Cavallius [21].
Observera att c och Δ i figuren skall läsas som c' och Δ' .



Figur 10. Normaliserade kapacitanser för en låda med $a = 1$ och $b = 0,5$. Efter Maruvada och Hyltén-Cavallius [21].
Observera att c och Δ i figuren skall läsas som c' och Δ' .



Figur 11. Normaliserade kapacitanser för en låda med $a = 1$ och $b = 1,0$. Efter Maruvada och Hyltén-Cavallius [21].
Observera att c och Δ i figuren skall läsas som c' och Δ' .

Ovanstående beräkning kan upprepas för ett större fordon, t ex den tidigare nämnda bussen med $L = 10,4$ m; $B = 2,4$ m och $H = 2,8$ m, för vilken EPRI angav $C = 1800$ pF. Markfrigången Δ antas vara $0,4$ m.

$$L = a = 10,4 \text{ m}; B = b = 2,4 \text{ m}; H = 2,8 \text{ m} \Rightarrow c = 2,8 - 0,4 = 2,4 \text{ m}$$

$$a' = 1,0; \quad b' = 2,4 / 10,4 = 0,23; \quad c' = 2,4 / 10,4 = 0,23$$

$$\Delta' = 0,4 / 10,5 = 0,038$$

$$l_e = (10,5 + 2,4 + 2,4) / \approx 5,1$$

Då $b / a = 0,23$ används Figur 9 och då fås att $C / 2 \pi \epsilon_0 l_e \approx 3,8$, dvs att

$$C \approx 3,8 \times 2 \pi \times 10^{-9} \times 5,1 / 36 \pi \approx 1077 \text{ pF}$$

Detta värde gäller utan speciell hänsyn tagen till däckens inverkan på den totala kapacitansen. Antag att däckens sänker medelmarkfrigången till $0,3$ m, d v s att $\Delta = 0,3$ m och att $\Delta' = 0,3 / 10,5 = 0,029$. Med detta värde fås med Figur 9 att $C / 2 \pi \epsilon_0 l_e \approx 4,6$ och därmed att $C \approx 1303$ pF.

Detta visar att avståndet till jord är en kritisk parameter som kan påverkas betydligt beroende på hur man tar hänsyn till däckens inverkan. I EPRIs värde på 1800 pF torde bidraget från däckens vara betydande. Stora och tunga fordon har kraftigare och bredare däck än små och deras däck är också uppbyggda av mer metall (cord). Detta ger ett större bidrag till den totala kapacitansen än vad små däck med lägre konduktivitet kan ge. Därmed bör det också vara svårare att beräkna kapacitansen för de tyngre fordonen än för de lättare.

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

$$U_c = I_c / \omega \quad [9]$$

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

För den tidigare nämnda bussen med $C_E = 1400$ pF

Med $H = 3,0$ m fås att $A_0 = 10,5 \times 2,5 + 2 \times 3 \times (10,5 + 2,5) \approx 104 \text{ m}^2$.

Med $E_0 = 10$ kV/m, 50 Hz fås vidare att:

$$I (\mu\text{A}) = 3,3 \times A_0 \times E_0 \quad [16]$$

$$I_c \approx 3,3 \times 104 \times 10 \approx 3,4 \text{ mA}$$

$$U_c = 0,0034 / (2 \pi \times 50 \times 1400 \times 10^{-12}) \approx 7,7 \text{ kV}$$

VEW redovisar också en uppmätning av spänningen till jord för olika fordon [16]. Spridningen är stor och i synnerhet för de större fordonen, men för en buss med $A_0 = 104 \text{ m}^2$ kan man uppskatta spänningen till ca 6 kV vid ett

ostört fält $E_0 = 10 \text{ kV/m}$. Detta värde gäller givetvis bara med bussen på ett isolerande underlag, med hjulen direkt på marken fås betydligt lägre värden.

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 och det ostörda fältet 0,10 och den når inte i något fall upp till 0,50. (Motsvarande beräknade faktor för skolbussen ovan är 0,77.)

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 bil 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 0,5 % av barnen och en något mindre andel av kvinnorna att passera gränsen för varaktig muskelkramp vid kontakt.

2.8 Induktion från 3-fas fält jämfört med från homogena fält

En del av de tidigare beräkningarna har baserats på ett homogent elektriskt fält. Det är ett idealfall som inte stämmer med verkligheten vare sig i närheten av kraftledningar eller i ställverk. För små föremål, som människor eller personbilar, spelar fältets homogenitet inte så stor roll. För stora lastbilar och bussar däremot, kan fältet variera kraftigt över den exponerade ytan. Är t ex bussen parkerad parallellt med en kraftledning, är variationen längs bussen ringa, men står den tvärs ledningen, så kan den vara avsevärd. För mer överslagsmässiga beräkningar kan man anta att fältet är homogent och har en styrka motsvarande maxvärdet av det inhomogena fältets.

För mer detaljerade beräkningar måste man emellertid ta hänsyn till fältets variationer och i vissa fall kan det vara nödvändigt för att inte onödigtvis överskatta problemen. Nedan följer ett beräkningsexempel hämtat från EPRIs publikation [11] som visar hur man tar hänsyn till inverkan av ett 3-fas fält och ett par exempel med bussar under kraftledningar återgett från en artikel av Reilly [22].

Fältets variation över ett föremål kan beaktas genom att studera inverkan av ett medelfält, med hänsyn tagen till både amplitud och fas, över hela föremålets längd inklusive bidrag för inverkan av föremålets sidor. EPRI har som exempel valt att studera en buss med $L = 10,4$ m; $B = 2,4$ m och $H = 2,8$ m (samma buss som förekommer i flera tidigare exempel).

Med bussen parkerad under och i rät vinkel till en kraftledning fås den effektiva längden till $1,5 + 10,4 + 2,0 \approx 14$ m, om hänsyn tas till inverkan av "fram- och bakgavel" på bussen. Detta är en buss av äldre modell, med en utstickande och lite lägre motorhuv och därför blir bidraget från "framgaveln" (1,5 m) mindre än från den vertikala "bakgaveln" (2,0 m).

Ledningen har en horisontell konfiguration och den högsta fältstyrkan fås strax utanför ytterfasen. Bussen har centrerats mitt under denna punkt (12,5 m) med maximal fältstyrka.

I Tabell 6 nedan visas en beräkning av medelfältet över hela bussens längd. Det beräknade medelfältet är 5,77 kV/m, d v s 86 % av det maximala fältet.

Mät punkt (m) 0 = mittfas	Fältstyrka (kV/m)	Fasvinkel (grader)	Fältets realdel (kV/m)	Fältets imaginär- del (kV/m)
6 (ändeffekt)	4,78	70,5	1,596	4,51
7 (ändeffekt)	5,14	49,3	0,954	5,05
8	5,54	86,5	0,338	5,53
9	6,05	93,9	-0,411	6,04
10	6,36	98,1	-0,896	6,30
11	6,63	102,2	-1,40	6,48
12	6,71	104,5	-1,68	6,50
13	6,68	106,3	-1,87	6,41
14	6,55	107,6	-1,98	6,24
15	6,26	109,0	-2,04	5,92
16	5,97	110,0	-2,04	5,61
17	5,64	110,0	-1,93	5,30
18 (ändeffekt)	5,29	110,0	-1,81	4,97
19 (ändeffekt)	4,88	111,0	-1,75	4,56
		Medel- värde	-1,06	5,67
			5,77	5,77/6,71 $\approx$ 86 %

Tabell 6. Beräkning av inverkan av ett 3-fasfält. Efter EPRI 1982 [11].

Två andra bussar har studerats av Reilly. Han redovisar i en artikel [22] inducerade strömmar i två olika bussar parkerade dels parallellt och dels vinkelrätt med en 500 kV dubbelledning. Se Figur 12. Måtten för de två bussarna anges i Tabell 7 nedan.

	Buss A	Buss B
Totallängd	10,14	11,94
Bredd	2,40	2,44
Höjd	2,72	2,90
Markfrigång	0,56	0,33
Motorhuv, längd	1,22	
Motorhuv, höjd	1,60	

Tabell 7. Mått på Buss A och Buss B. Efter Reilly [22].

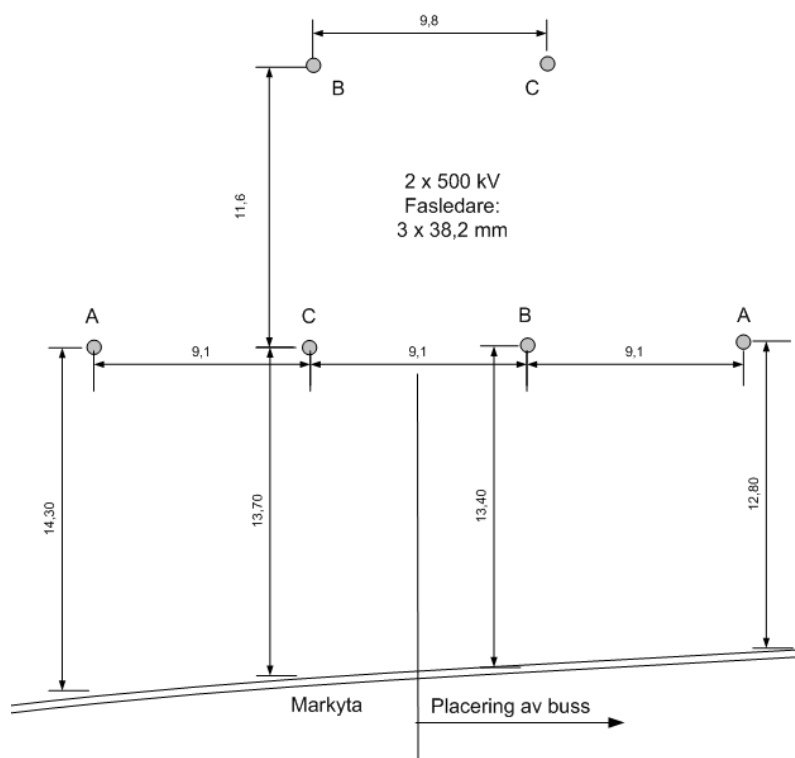
Bussarna parkerades på isolerande underlag under kraftledningen och på sex olika avstånd mellan ledningens centrumlinje och mittpunkten på respektive buss. För var mätpunkt mättes den elektriska fältstyrkan, den inducerade strömmen till jord och uppladdningsspänningen. Se Tabell 8 nedan.

Avstånd från ledningens centrumlinje (m)	Fältstyrka (kV/m), 60 Hz	Buss placerad vinkelrätt mot ledningen		Buss placerad parallellt med ledningen	
		Ström till jord I _c (mA)	Uppladdningsspänning U (kV)	Ström till jord I _c (mA)	Uppladdningsspänning U (kV)
Buss A					
0	2,70	0,77	0,37	1,00	0,47
3,05	2,80	0,78	0,38	1,07	0,49
6,10	2,75	0,80	0,39	1,05	0,51
9,15	3,10	1,05	0,47	1,25	0,59
12,20	4,45	1,45	0,71	1,65	0,79
15,25	5,45	1,84	0,87	2,03	0,98
Buss B					
0	2,70	0,84	0,82	1,28	1,18
3,05	2,80	0,83	0,81	1,34	1,37
6,10	2,70	0,93	0,90	1,51	1,24
9,15	3,20	1,36	1,25	1,52	1,45
12,20	4,50	1,85	1,77	2,15	2,02
15,25	5,40	2,20	2,02	2,62	2,42

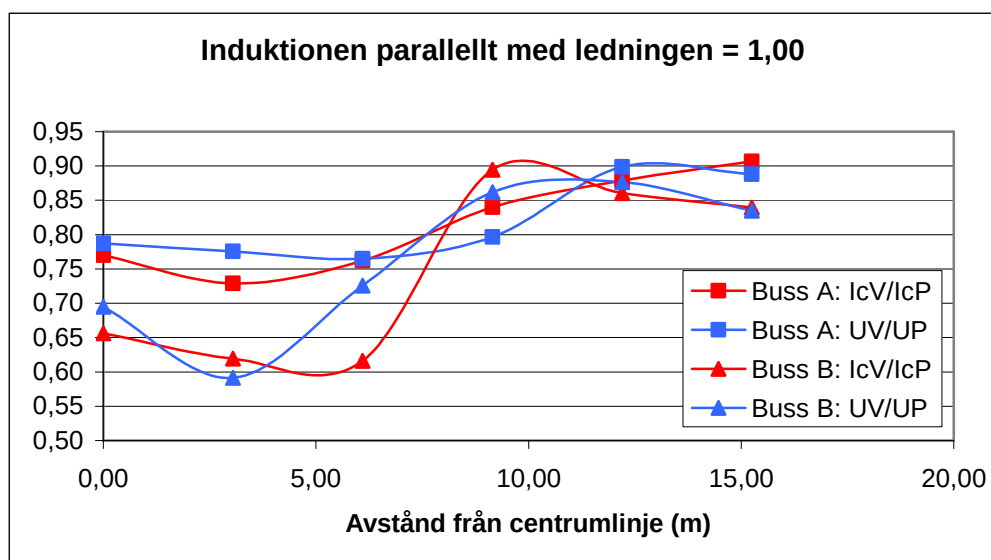
Tabell 8. Induktion i två olika bussar under en kraftledning. Efter Reilly [22].

Relationen för ström och spänning för en vinkelrätt placerad buss relativt en parallellt placerad buss framgår av Figur 13. Inom ledningens ytterfaser är induktionen tydligt beroende av bussens placering, skillnaden kan uppgå till 40 %. Utanför de yttre faserna är skillnaden mindre, i storleksordningen 10 – 15 %.

Detta innebär att man vid överslagsberäkningar utanför ledningens ytterfaser kan betrakta induktionen som maximal. Innanför ytterfaserna krävs mer noggrannhet för att inte överskatta induktionen.



Figur 12. Fasledarnas placering vid experiment med bussar. Omarbetad efter Reilly [22].



Figur 13. Induktion i en buss vinkelrätt (V) ledningen relativt induktionen parallellt (P) ledningen. Omarbetad efter Reilly [22].

2.9 Andra effekter av gnisturladdningar och kontaktströmmar

2.9.1 Hög strömtäthet orsakad av kontaktströmmar och tänkbara långtidseffekter

Under de senaste åren (efter 2000) har det publicerats ett antal artiklar om sambandet mellan kontaktströmmar och strömtäthet och om eventuella långtidseffekter. Tanken är att dessa strömmar eventuellt skall kunna ge upphov till en så hög strömtäthet i benmärgen hos framförallt barn, att det finns risk för att de skall kunna utveckla leukemi. Dessa tankegångar har baserats på detaljerade dosimetriska beräkningar utförda av UVic-gruppen vid University of Victoria i Kanada.

Nedan följer ett försök att återge huvuddragen i detta resonemang:

I en artikel i IEEE Transactions for Biomedical Engineering 2001 [23] visar författarna på de betydande skillnader i strömtäthet som fås i benmärgen hos ett barn jämfört med hos en vuxen individ beroende på att barnets ben har ett betydligt mindre tvärsnitt.

För beräkningarna har ett "UVic-barn" skapats genom att skala ner den anatomiska modellen UVic från 1,77 m och 77,6 kg till 1,10 m och 18,0 kg, motsvarande ett 5-årigt barn.

Vid beräkningarna har en ström på 0,1 mA rms letts in via en kontaktpunkt i vänster handflata. Barnets kontaktpunkt var 3,68 cm² och den vuxna mannens 4,67 cm². Jordkontakten via fötterna motsvarade hela fotsulan.

Tre exponeringsscenarier har studerats:

A: Höger hand och båda fötterna är jordade

B: Höger hand är jordad

C: Båda fötterna är jordade

Den beräknade resistansen mellan kontaktpunkten i vänster hand och jord är en användbar kontrollpunkt med annan litteratur. I artikeln ges följande uppgifter:

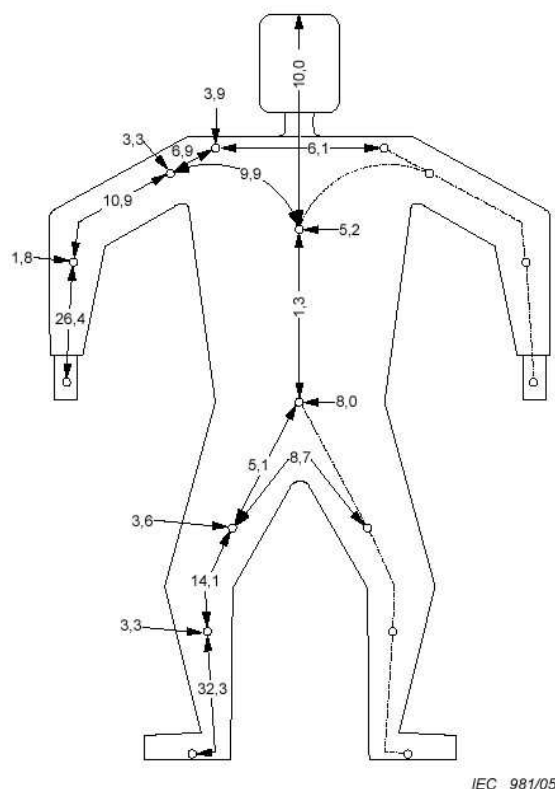
Modell	Resistans till jord (Ω)			Kvot A/B	Kvot A/C
	Scenario A	Scenario B	Scenario C		
UVic, barn	1821	2561	1991	0,71	0,91
UVic, vuxen	1067	1685	1183	0,63	0,90

Tabell 9. Beräknade resistanser för strömbanan mellan vänster hand och jord.

Resistansvärdena för den vuxna mannen kan jämföras med de relativa resistanserna som visas i Figur 14, återgiven från IEC-standard 60479-1:2005 [12]. I Figuren motsvarar 100 resistansen mellan hand och fot. Med värden från figuren kan den relativa resistansen för Scenario A beräknas till 57,2, för B till 84,5 och för C till 71,8. Kvoten $A/B = 0,68$ och $A/C = 0,80$. För den vuxna UVic-modellen fås $A/B = 0,63$ och $A/C = 0,90$. Överensstämmelsen är inte perfekt men acceptabel.

Resistansernas absolutvärden är betydligt svårare att bestämma. Med elektroder i händerna och fötterna torde hudens övergångsresistans kunna försummas. Kroppens inre resistans är beroende på kontaktpunkternas storlek, deras tillstånd (torra eller fuktiga) och spänningen mellan kontaktpunkterna.

För strömgenomgång hand – hand och torra kontaktpunkter med storleken $1-12,5 \text{ cm}^2$ visas i IEC 60479-1 [12] att den inre resistansen går mot ett värde på ca 1100Ω med stigande spänning. Detta är dock mätt på bara en individ och spridningen mellan individer torde vara betydande. Värdet för Scenario B – 1685Ω synes i vart fall inte vara för lågt, snarast något för högt.



IEC 981/05

Figur 14. Interna delresistanser i människokroppen. 100 motsvarar resistansen hand – fot. Återgiven efter IEC TS 60479-1:2005 [12].

Beräkningarna med de båda UVic-modellerna presenteras som strömtäthet för hjärnan, hjärtat och ryggmärgen. För vart organ redovisas medelvärden, rms-värden, 99:e percentilen (d v s ett värde som inte överskrids i 99 % av beräkningspunkterna) samt maxvärden. 99:e-percentilen bör användas i stället för maxvärden då de senare kan vara kraftigt påverkade av randeffekter och ofullkomligheter i beräkningsmodellen.

För var grupp anges resultatet utan medelvärdesbildning (J) och medelvärdesbildat över 1 cm^2 enligt metoderna T och F. Vid båda metoderna bildas medelvärdet över 1 cm^2 med beräkningspunkten som centrum. För den "vuxna" modellen motsvarar 1 cm^2 3×3 beräkningspunkter. Vid T-metoden tas endast hänsyn till mätvärden inom ett visst organ (t ex hjärnan). Punkter som ligger utanför hjärnan "nollas", vilket sänker medelvärdet i randzonen. F-metoden inkluderar alla 9 mätvärden inom 1 cm^2 och även om de tillhör ett annat organ. Detta innebär att medelvärdet för randpunkter inom ett visst organ kan påverkas både uppåt och nedåt beroende på strömtätheten i angränsande organ. En hög strömtäthet i närliggande vävnad höjer medelvärdet i det studerade organet. För både hjärnan och ryggmärgen kan detta vara kritiskt eftersom de gränsar till hålrum fyllda med s k cerebrospinalvätska med hög konduktivitet och därmed hög strömtäthet. F-medel för hjärnan och ryggmärgen skall således vara högre än T-medel p g a av påverkan från cerebrospinalvätskan

Gemensamt för de tre exponeringsscenarierna är att hjärnan uppvisar en låg strömtäthet. Detta är helt naturligt eftersom en ström från vänster hand till höger och/eller till fötterna inte skall passera huvudet.

I hjärtat fås högre strömtäthet och allra högst vid scenario C då all ström skall gå ner till fötterna. Barnets hjärta drabbas av en betydligt högre strömtäthet än den vuxna individens, det skiljer vanligen en faktor 2 – 3. Den 99:e percentilen når hos barnet och scenario C upp till $5,14 \text{ mA/m}^2$ vid $0,1 \text{ mA}$ kontaktström. Gränsen för direkt påverkan på hjärtats funktioner anses ligga runt 1 A/m^2 , varför detta inte skall behöva innebära några allvarliga problem.

Även i ryggmärgen fås de högsta värdena vid scenario C och betydligt högre värden hos barnet än hos den vuxna individen. Skillnaden är vanligen en faktor 2 – 2,5. Den 99:e percentilens T och F-medel ligger på 2,00 respektive $2,29 \text{ mA/m}^2$ vid $0,1 \text{ mA}$ kontaktström. Detta innebär att redan en kontaktström på $0,1 \text{ mA}$ medför en strömtäthet som motsvarar gränsvärdet för allmänheten. För den vuxna individen krävs en kontaktström på ca $0,2 \text{ mA}$ för att uppnå 2 mA/m^2 .

Detta innebär också att ICNIRPs och EUs begränsning av kontaktströmmarna för allmänheten på $0,5 \text{ mA}$ stämmer dåligt med den grundläggande begränsningen/gränsvärdet på $2,0 \text{ mA/m}^2$. Kontaktströmmar på $0,1$ respektive $0,2 \text{ mA}$ måste i detta sammanhang anses vara helt realistiska.

Begränsningarna för arbetstagare på 1 mA respektive 10 mA/m^2 stämmer däremot bättre överens.

Författarna bakom IEEE-artikeln fortsätter med att utreda den elektriska fältstyrkan i benmärgen i olika kroppsdelar. Högst strömtäthet fås i benmärgen i vänster underarm, då denna passeras av all ström och har minst tvärsnitt. Relationen mellan strömtätheten hos barnet och den vuxna individen är vanligen en faktor 2 – 3.

Hos barnet i benmärgen i vänster underarm fås vid en kontaktström av 0,1 mA, 60 Hz; 506 mV/m och 1487 mV/m som medelvärde respektive 99:e percentil. Motsvarande värden för den vuxna individen är 166 mV/m respektive 463 mV/m. Dessa värden gäller för alla tre scenarierna. I de övriga kroppsdelarna fås olika fältstyrka beroende på hur strömmen går.

Scenario B, med strömgenomgång mellan vänster och höger hand, ger naturligtvis låga värden i benens benmärg, men ändå en medelfältstyrka räknat över all benmärg i kroppen på ca 7,7 mV/m.

Dessa värden ligger långt över den gräns på 1 mV/m, som anses finnas för biologisk aktivitet orsakad av en lokal elektrisk fältstyrka och just benmärgen anses vara intressant på grund av sin betydelse för utvecklingen av leukemi. Med ovanstående relationer borde en kontaktström av blott en eller några µA räcka för att åstadkomma fältstyrkor över 1 mV/m.

I en artikel av Sastre och Kavet [24] diskuteras om kontaktströmmar kan vara en alternativ orsak till leukemi hos framförallt barn, då sambandet mellan låga magnetfält ($< 1 \mu\text{T}$) och biologisk aktivitet betraktas som ett ännu oförklarat område. Kontaktströmmar av den här storleken är inte märkbara och skulle kunna förekomma även i hemmiljö.

2.9.2 Påverkan på pacemakers

Pacemakerbärare är en särskilt känslig grupp för elektrisk påverkan och de har framförallt tidigare varnats för att passera metalldetektorer vid flygplatser och stöldskyddsågar, likaså har pacemakerbärare inte kunnat röntgas med sk magnetkamera på grund av risken för interferens.

Risken att störa själva pacemakerdosan i sig torde vara mycket liten, utan den känsliga delen är elektroderna som stimulerar hjärtmuskeln. Det finns två huvudtyper av elektroder – de unipolära och de bipolära. Vid användning av en unipolär elektrod fungerar själva pacemakerdosan som andra elektrod och avståndet mellan dem blir då långt. Vid användning av bipolära elektroder finns båda elektroderna vid spetsen av elektrodkabeln. Det kortare avståndet mellan elektroderna ger en betydligt lägre känslighet för yttre störningar.

Andelen pacemakers med bipolära elektroder ökar stadigt och idag inopereras nästan uteslutande bipolära elektroder. Detta har gjort att risken för störningar i samband med passage av stöldskyddsågar och liknande har minskat kraftigt. Pacemakerfunktionen skyddas också av filter som skall minska risken för störningar från kraftfrekventa signaler.

Kvar finns dock en risk för störningar orsakade av kraftiga elektriska och magnetiska fält och av kontaktströmmar. Det senare fallet belyses i en artikel

av Dawson, Caputa och Stuchly [25]. Man beskriver i artikeln störningar på framförallt unipolära elektroder, men ett kortare avsnitt ägnas också åt att uppskatta känsligheten för bipolära elektroder.

Vid studien har man nyttjat en exponeringssituation identisk med den ovan beskrivna för kontaktströmmar hos en vuxen individ och ett barn. Kontaktströmmen har letts in via en elektrod i vänster hand och olika scenarier med höger hand och/eller fötterna jordade har studerats.

För en pacemaker med bipolär elektrod visas känslighetsnivån för en kontaktström variera mellan 63 och 340 μA beroende på om pacemakerdosan placerats på höger eller vänster sida i bröstet och hur elektroden har förts in i hjärtat. Vid beräkningen har man inte tagit hänsyn till eventuell filtrering av signalen och därför ligger sannolikt tröskelvärdet för påverkan betydligt högre. Beräkningarna är dock kraftigt förenklade och andra värden kan förväntas med alternativ elektrodplacering

ICNIRPs och EUs begränsningar på 0,5 respektive 1,0 mA förväntas ge ett godtagbart skydd för störningar på pacemakers med filtrering av signalen.

2.10 Påverkan av statiska fält

Även statiska fält kan påverka människan genom uppladdning och urladdning och upplevelsen av smärta kan i vissa fall bli densamma. Ämnet behandlas dock betydligt mera kortfattat än inverkan av växelfälten, men en del finns att nämna:

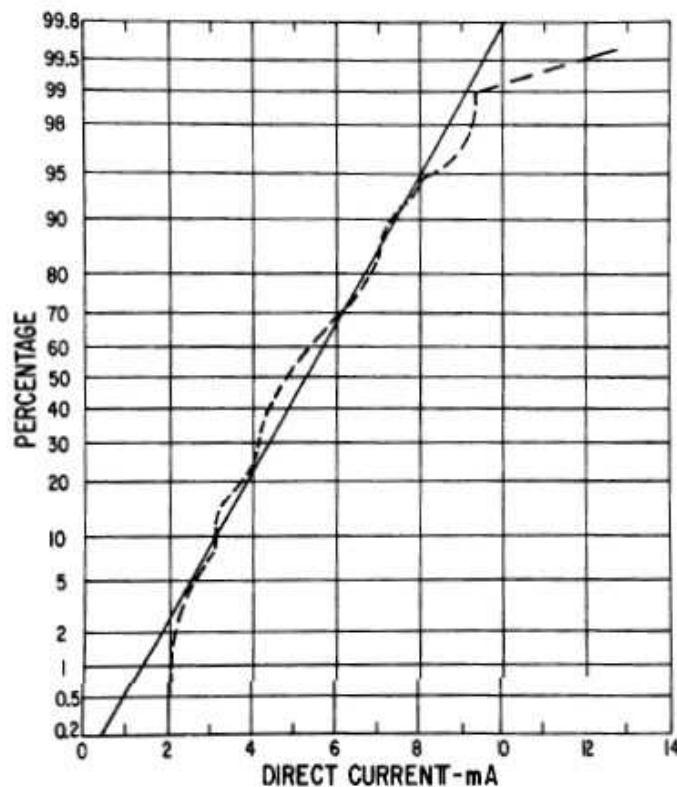
ICNIRP Guidelines [1] behandlar bara *"time-varying electric, magnetic, electromagnetic fields"* så därför ger inte denna skrift någon vägledning om statiska fält.

EUs rekommendation för begränsning av allmänhetens exponering omfattar även statiska fält [2] och begränsningen för kontaktströmmar är densamma inom frekvensområdet 0 – 2,5 kHz. Därtill sägs i en anmärkning att:

"Denna rekommendation innehåller inga kvantitativa begränsningar för statiska, elektriska fält. Det rekommenderas emellertid att besvärade perception av elektriska ytladdningar och gnisturladdningar som förorsakar stress eller irritation skall undvikas."

EUs direktiv för arbetstagare [3] är på denna punkt formulerat på ungefär samma sätt som rekommendationen för allmänheten. Det ges en begränsning för kontaktströmmar vid 0 Hz, men det ges ingen begränsning för det elektriska fältet. Begränsningen är densamma inom hela frekvensområdet 0 – 2,5 kHz, dvs 1,0 mA.

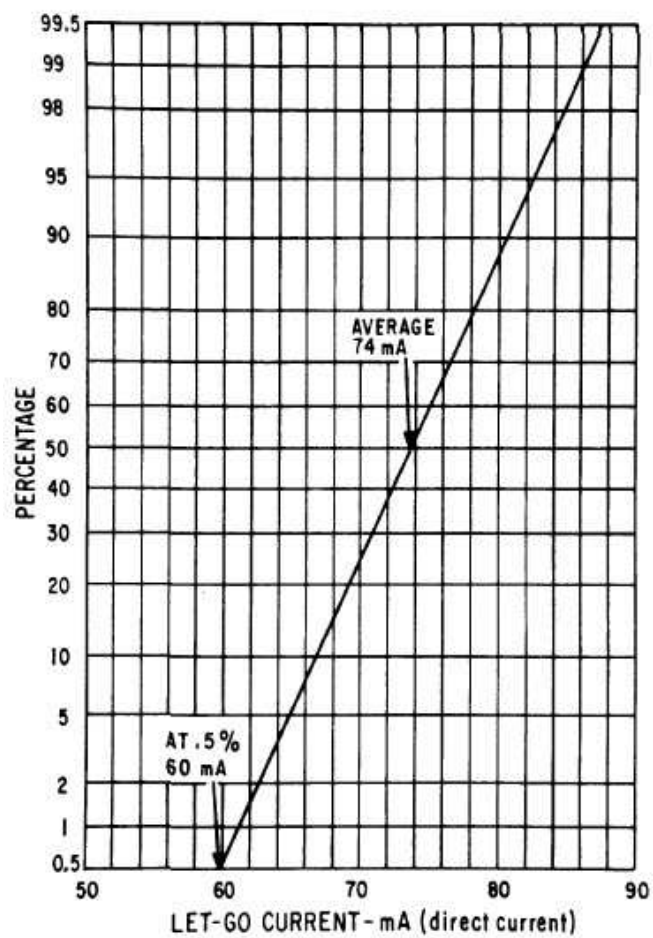
Även IEEE C95.6-2002 [9] omfattar kontaktströmmar inom hela frekvensområdet 0 – 3 kHz och begränsningen är densamma från 0 Hz till 3 kHz.



**Figur 15. Förnimmelse eller perception för DC-kontaktsröm.
Data från en undersökning med 115 män. Efter EPRI 1982 [11].**

Känsligheten för DC-kontaktströmmar skiljer sig dock markant från motsvarande 50 Hz strömmar. Figur 15 och Figur 16 åskådliggör detta.

Figur 15 kan jämföras med Figur 1, som visar motsvarande för 60 Hz. Vid 60 Hz (och 50 Hz) kommer ungefär 40 % av männen att märka en kontaktström på 1,0 mA. Motsvarande DC-ström är möjligen märkbar för 0,5 %. Relationen för varaktig muskelkramp (Let-Go) är densamma. Jämför med Figur 2. Vid 60 Hz (och 50 Hz) kommer 0,5 % av männen att passera gränsen för varaktig muskelkramp vid 9 mA och för DC är motsvarande gräns 60 mA.



Figur 16. Gränsen för varaktig muskelkramp för en DC-kontaktström. Data från en undersökning med 167 män. Efter EPRI 1982 [11].

3 Pågående examensarbeten

Både på KTH och CTH har det under våren 2006 bedrivits examensarbeten för att undersöka hur stora kontaktströmmarna kan bli på grund av det elektriska fältet från kraftledningar och ställverk.

Examensarbetenas resultat visar på en mycket bra överensstämmelse med tidigare teoretiska och praktiska övningar, både sådana som bedrivits inom landet och internationellt, och som finns beskrivna i rapporter och artiklar.

3.1 Uppladdning av fordon

I examensarbetet "Elektrisk influens på fordon under kraftledning" [26], utfört av Adib El-Sherif vid KTH, har studerats hur två uppställda bussar med längden 18 meter respektive 11,2 meter under en 220 kV-kraftledning i Huddinge uppladdas. I det här aktuella fallet är faslinorna placerade på höjden 15,5 meter över mark och med fasavståndet 6,6 meter. Syftet med studien var att:

- Analysera potentialer under kraftledningen.
- Undersöka vilka beröringsspänningar en buss kan få som står parkerad under en 220 kV:s kraftledning.
- Undersöka om beröringsspänningen kan ge upphov till kontaktströmmar som är högre än de i EU-direktivet angivna insatsvärdena.
- Undersöka om energin i en gnistbildning kan ge upphov till antändning av en bränsle-luftblandning.

Beräkningar av influensspänning och kortslutningsströmmar har utförts på de två busslängderna med 2- och 3-dimensionella beräkningsmodeller med programmet Comsol Multiphysics™. Dessutom har 2-dimensionella analytiska linjeladdningsberäkningar utförts. Den 18 meter långa bussens beräknade maximala kortslutningsström var 0,77 mA och influensspänningen 1,3 kV. Vid dessa beräkningar har bussen stått parallellt med och under kraftledningen. Avståndet mellan mark och bussens undersida var 0,40 meter.

Ett av fordonens simulerade och beräknade influensspänning och kortslutningsström har sedan använts i en Theveninekvivalent, ett ekvivalent kretsschema av bussen. I schemat har därefter ett motstånd kunnat kopplas in för att efterlikna däckens resistans. Mätningar har sedan utförts på en buss uppställd under den aktuella 220 kV:s kraftledningen i Huddinge. En jämförelse mellan beräknad och uppmätt influensspänning visar på en mycket god överensstämmelse.

Även en jämförelse mellan simulerade värden på en miniatyrmodell av en buss under en enkelledare och uppmätt influensspänning och kortslutningsström har genomförts. Här var skillnaden mellan kortslutningsströmmarna större än i tidigare jämförelse medan influensspänningarna fortfarande visade på en relativt god överensstämmelse.

Beräkningar visar att om bussen hade parkerats vinkelrätt mot och under kraftledningen hade influensspänningen blivit ungefär 15 till 20 procent lägre.

Det är bussens egenvikt som är avgörande för hur stor kapacitansen i däckens blir. Det är också en stor variation i olika däckens ledningsförmåga, vilket kunde beräknas genom att efterlikna däckens resistans i det ekvivalenta krets-schemat. Spänningen ändras beroende på markens beskaffenhet och på vad som finns mellan buss och mark.

3.2 Kontaktströmmar i ett 400 kV:s ställverk

I examensarbetet, "Human contact currents induced by electrical field in Swedish 400 kV substations" [27], av Jonas Cedergren på CTH, har studerats vilka föremål som driftpersonalen tar i samt vilka kontaktströmmar de blir utsatta för vid arbeten i 400 kV:s ställverk. Utgående från detta har sedan ett stort antal mätningar gjorts på olika platser i ställverket för att se vilka kontaktströmmar som uppstår när en människa tar i olika föremål. Det elektriska fältet har även mätts på vissa platser där en stor kontaktström har mätts.

Kontaktströmmens gränsvärde kan endast hänföras till den kontinuerliga strömmen sedan kontakt har etablerats mellan föremålet och människan och en kontaktström går genom kroppen, inte själva gnisturladdningen. En kontaktström uppstår på tre olika sätt, nämligen:

- När en människa har kontakt med två olika föremål som har olika potential.
- När en människa är jordad och tar i ett föremål som har potential mot jord.
- När en människa är elektriskt uppladdad och tar i ett jordat föremål.

För att mäta kontaktströmmen har instrumentet Metrahit 29S använts. Detta mäter strömmens RMS-värde. Till instrumentet har ett justerbart metspö med en kopparelektrod anslutits som en antenn till instrumentet. På instrumentet har också en cirka 15 cm² rund kopparelektrod anslutits. Genom att sätta metspöts kopparelektrod mot ett jordat föremål och sedan hålla tummen på den runda kopparelektroden på instrumentet, har kontaktströmmen som går genom människan kunnat överföras till instrumentet.

Kontaktströmmen har mätts när personalen tagit i olika apparatskåp i ställverket och uppmätta värden har varit mellan 120 μ T och 180 μ T. Den maximala uppmätta kontaktströmmen mellan ett jordat föremål och en person har således varit 180 μ A.

Det är vanligt att personalen har fordon inne i ställverket när olika typer av arbeten utförs. I det här fallet har en kombibil/pickup används för att studera vilken ström som flyter från bilen till ett jordat föremål. På grund av att stora gnisturladdningar skulle ha uppstått innan en kontinuerlig kontaktström etablerats ingick ingen försöksperson i mätkretsen. Uppmätt ström från bilen till jord var 1,17 mA.

En skyddsdocka inlindad i folie och målad med en kapacitiv färg har också använts vid mätning av kontaktström. När dockan var försedd med en skyddsdräkt och stod på ett jordat plan med ena handen i kontakt med ett apparatskåp, uppmättes kontaktströmmen till 90 μ A. Det ostörda elektriska fältet runt om uppmättes till 5,6 kV/m. Gjordes samma mätning utan skyddsdräkt på dockan, blev den uppmätta kontaktströmmen 120 μ T.

De skyddskläder som finns framtagna sedan tidigare skyddar mot gnisturladdningar. En förutsättning är att de strips som löper längs varje ben kopplas ihop med skodonen med hjälp av en krokodilklämma.

Uppmätta gnisturladdningar i storleksordningen 1,75 A har gjorts i den här studien. Det är också gnisturladdningarna som personalen upplever som mest besvärande, inte kontaktströmmen.

Personal som håller på med underhåll och service på brytare tillbringar cirka 25 – 30 procent av sin arbetstid ute i ställverk och är därmed den personalgrupp som vistas mest i ställverksmiljö.

4 Verifierande experiment

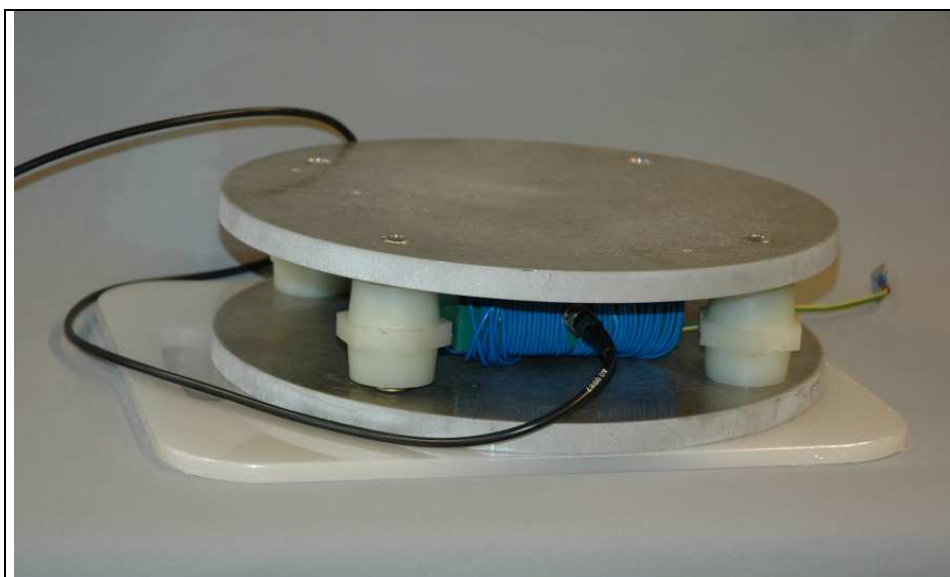
4.1 Mätning av kontaktströmmar i ställverksmiljö

Under hösten 2006 genomfördes några enklare experiment med kontaktströmmar i ett 400 kV ställverk. Syftet med dessa experiment var dels att ännu en gång verifiera de beräkningsmodeller som finns för kontaktströmmar och dels att få bekräftat att själva mätuppställningen är användbar i denna miljö.

I princip kan kontaktströmmen via fötterna till jord från en stående person mätas genom att mäta spänningsfallet över en lämplig resistans. Då strömmen är låg, mindre än 200 μA , krävs en tämligen stor resistans för att få en utspänning av lämplig storlek. Ett alternativ är att nyttja en sk Pearson prob dvs en strömtransformator som inte påverkar impedansen mellan person och jord. Vid dessa mätningar användes en Pearson prob typ 3525 med omsättningen 0,1 V / A placerad i ett platta-platta gap. För att få bättre omsättning lindades primärledaren 100 varv runt proben och omsättningen blev därmed 1 mV / 100 μA . Se Figur 17.

Figur 18 visar försökspersonen Ronny Hagman från STRI ståendes på gapet med Pearson proben inkopplad mellan plattorna.

Det vertikala elektriska fältet i mätpunkten uppmättes till 10,4 kV/m på 1 meters höjd, till 11,9 kV/m på 1,5 meters höjd och till 12,1 kV/m på 2 meters höjd. Ronny är ca 1,82 m lång, har normal kroppsform och på fötterna har han skor med en ca 2,5 cm tjock gummisula. Skor och gap ökar hans längd med ca 10 cm.



Figur 17. Detalj av gap för strömmätning.



Figur 18. Försökspersonen Ronny Hagman stående på gapet.

Med försökspersonen stående som i Figur 18, med armarna längs sidorna uppmättes $164 \mu\text{A}$.

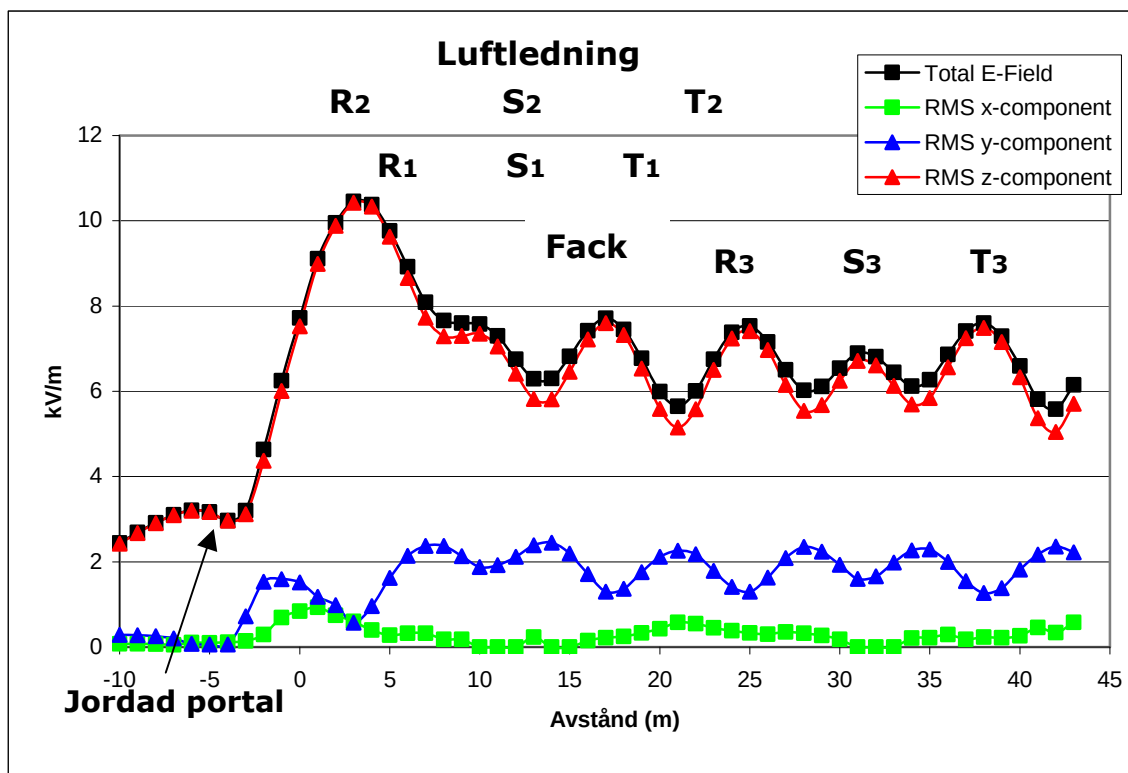
Uttrycket [2] används för att beräkna strömmen till jord med fältstyrkan på 1,5 meters höjd som ett rimligt värde för huvud och bål.

Med $E = 11,9 \text{ kV/m}$, $F = 50 \text{ Hz}$ och $h = 1,85 \text{ m}$ fås att $I_c \approx 177 \mu\text{A}$.

För beräkning av skosulornas inverkan på strömmen används uttrycket [7], med värden på C beroende på sulornas tjocklek. De på sidan 12 angivna värdena på C gäller torra sulor, men i detta fall var den ena sulan fuktig p g a sprickor. En senare mätning visade att kapacitansen för de aktuella skorna ökar från ca 150 pF till ca 600 pF när sulan genomfuktas. Korrektionstermen blir i detta fall $16 \mu\text{A}$ och den korregerade strömmen $177 - 16 = 161 \mu\text{A}$. Skillnaden mellan uppmätt och beräknat värde blir därmed ca 2 %.

4.2 Mätningar av E-fält i ställverk

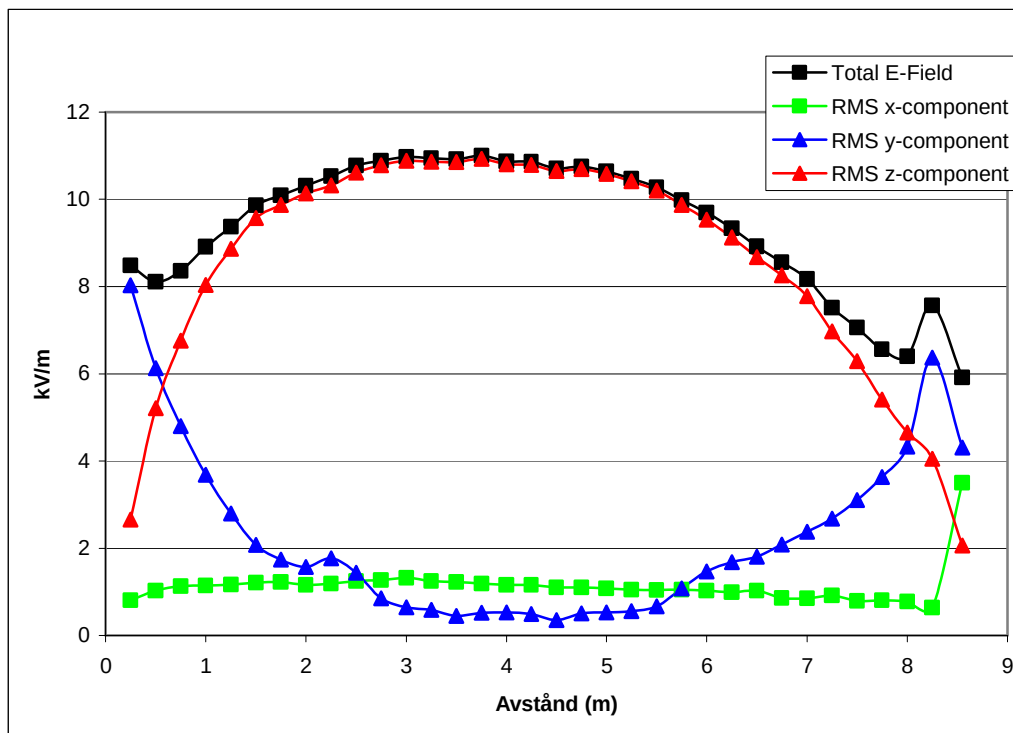
I de mätningar som redovisades i avsnittet ovan befann sig försökspersonen i ett elektriskt fält på $10 - 12 \text{ kV/m}$. Det är förhållandevis höga värden och inte representativa för 400 kV ställverk som helhet. Figur 18 visar en typisk miljö med generellt höga fält; en väg under lågt belägna skenor och med tämligen



Figur 19. Den elektriska fältstyrkan längs vägen i Figur 18 och vinkelrätt mot två fack. Observera inverkan av den jordade portalen.

långt till jordade apparatstativ. Fältets variationer är dock stora, på 1 meters höjd från ca 6 kV/m till ca 10 kV/m, se Figur 19. Högst fältstyrka fås strax utanför ytterfasen (R1) i det första facket (R1, S1, T1). Orsaken till detta är dels bidraget från en inkommande och högre belägen luftledning (R2, S2, T2) och dels att fältet under ytterfasen inte påverkas nämnvärt av andra faser. Fältet under R3 är t ex ca 25 % lägre än under R1.

Det elektriska fältet påverkas kraftigt av apparatstativ och andra jordade föremål i ställverket. Detta visas tydligt i Figur 19 där inverkan av den jordade portalen vid infarten till ställverket framgår mycket tydligt. I Figur 20 visas en mätning av det elektriska fältet parallellt med ytterfasen i det första facket i Figur 19, dvs under R1. Mätprofilen börjar vid ett brytarstativ, korsar vägen och slutar vid ett frångiljarstativ (dvs från vänster och till höger i Figur 18). E-fältets vertikalkomponent är högst mitt på vägen och avtar kraftigt när man närmar sig de båda stativen. Y-komponenten, fältet längs mätlinjen, ökar däremot helt logiskt närmare stativen. Denna ökning kan dock inte kompensera vertikalfältets minskning och totalfältet blir därmed försvagat i närheten av de båda stativen. Figurerna 21 och 22 visar miljön i början och slutet av mätlinjen.



Figur 20. Mätprofil mellan apparatstativ.



Figur 21 Mätprofilens början invid ett brytarstativ (till vänster i figur 18) och Figur 22 mätprofilens slut invid ett frånskiljarstativ (till höger i Figur 18).

4.3 Experiment med ledande tyg

4.3.1 Ledande tyg, leverantörer och produkter

På marknaden finns idag tyger att köpa som har skärmande egenskaper mot högfrekvent elektromagnetisk strålning. Det finns även en sömmerska som efter måttbeställning skräddarsyr kläder och inredningsdetaljer efter kunders önskemål. En stor del av kunderna är elöverkänsliga.

Priset på ett skärmande tyg är mellan 465:- och 1425:- per meter, beroende på vilket tyg det är och tygets bredd.

Hos företaget RTK AB i Vallentuna [28] finns det flera olika typer av tyger för försäljning och som används vid avskärmning av högfrekvent elektromagnetisk strålning. Bland annat finns tygerna *Picasso* som är en polyamidväv med silver och *Dali* som är en finmaskig nylonväv med silverbelagda fibrer. *Picasso* är en ogenomskinlig stark fallskärmsväv, medan *Dali* är en halvgenomskinlig elastisk och mjuk trikåstickad textil. Dali har en maskbredd som är mindre än 0,5 x 0,5 mm.

Dessa tyger ger, enligt datablad, en dämpning på 35 dB till 48 dB i frekvensområdet 200 MHz – 10 GHz. Tygerna kan också jordas och skärmar då elektriska fält av lägre frekvens, dock anges inga frekvenser eller dämpning inom ELF-området (Extremely Low Frequency). De har också "textila egenskaper och är mjuka, lena och antiseptiska". Ytan hos tygerna anges ha en mycket god ledningsförmåga, mindre än 0,5 ohm per meter vid bredden 1 meter. De båda tygerna anges ha speciellt goda egenskaper vid skärmning av stora ytor samt är lätta att klippa och sy.

Tygerna uppges skärma i alla riktningar och det finns inga restriktioner på hur man orienterar dem i rummet eller på kroppen.

ELRO [29] är ett företag som finns i Målsryd, i Boråstrakten, som säljer tyger och andra avskärmningsprodukter, och som dessutom har en sömmerska som skräddarsyr efter kundernas önskemål.

De tyger som bland annat saluförs är *Swiss Shield*, en bomullsväv, och *Swiss Shield Evolution*, ett tyg som är spunnet av polyestergarn. I garnet finns en supertunn försilvrad och lackad koppartråd.

Båda tygerna är utförda enligt milstandard. Provnormer är: MIL-STD285, NSA65-6, Öko-Tex Standard 100 + 1000, EN25077, EN26330, SN EN1102, ISO 105-D01, SN ISO 105-E04 u.a.

Swiss Shield ger en dämpning på 32 dB vid frekvensen 1,8 GHz och för *Swiss Shield Evolution* är dämpningen 23 dB vid 1,8 GHz. Dämpningen gäller "när tyget utgör en perfekt heltäckande Faradays bur".

Exempel på kläder och inredningsdetaljer som sytts hos företaget ELRO är: långskjorta med ståkrage, långskjorta med kapuschong, långkjol, sjalar, draperier och gardiner. Bomullsväven, *Swiss Shield*, används också till att

skärma av väggar och tak. Det är idag vanligt att avskärmande tyger används för att fodra fickor där mobiltelefonen förvaras.

En annan tänkbar applikation för dessa tyger är som foder eller "mellanfoder" i arbetskläder för arbete i ställverk och andra miljöer med måttligt höga elektriska fält (5 – 20 kV/m).

4.3.2 Mätning av dämpning av 50 Hz E-fält

De ledande tygernas förmåga att dämpa eller skärma ett 50 Hz E-fält är givetvis intressant för applikationer i ställverk mm, men då de har sitt tänkta användningsområde i det högre frekvensområdet, framgår tyvärr inte detta av tillgängliga specifikationer. En kontroll av dämpningen vid 50 Hz är därför högst befogad.

För kontrollmätningen nyttjades ett större platta-platta gap för att få ett område med homogent och vertikalt fält. Gapets dimensioner framgår av Figur 23.

Det elektriska fältet i gapet har beräknats med ett FEM- (Finita Element) program och i Figur 24 visas den relativa fältstyrkan i vertikalled längs en linje genom gapets centrum. Avvikelsen från 100 % är en följd av att gapet inte står ute i fria rymden, utan på ett golv som antas vara ett perfekt jordplan. Denna påverkan är dock inte i något fall större än 0,5 %.

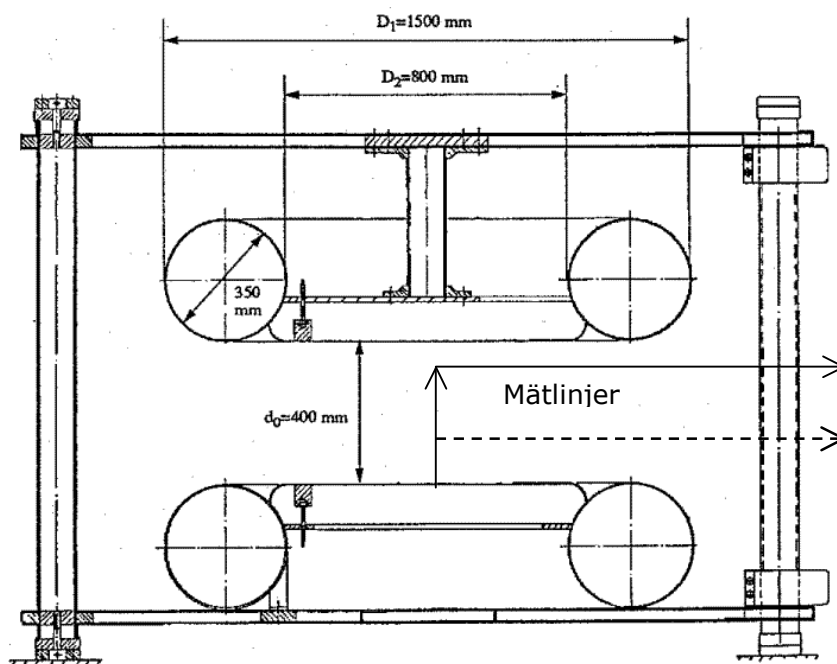
I Figur 25 visas den relativa fältstyrkan längs två horisontella linjer från gapets centrum och ut mot periferin.

Av Figurerna 24 och 25 framgår att det i kalibreringsgapet finns en cylinder med en radie på ca 10 cm, som uppvisar god homogenitet. Avvikelsen från perfekt homogenitet är inom denna mindre än 1 %.

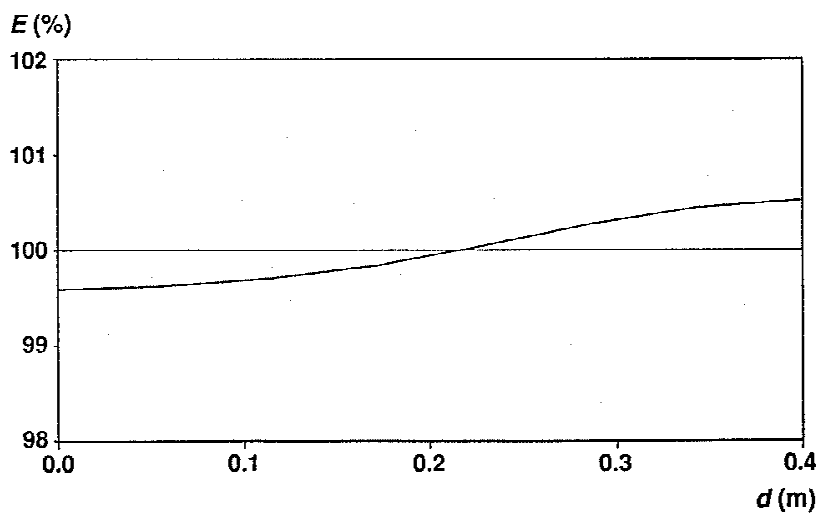
Spänningen till gapet applicerades från en mindre spänningstransformator som matades från lågspänningssidan (sekundärsidan) från en vridtransformator. Arrangemanget medger en fritt reglerbar provspänning upp till maximalt 20 kV. I gapet, med gapavstånd 0,4 m, fås därmed en högsta fältstyrka av 50 kV/m.

Spänningen till gapet mättes med en Fluke högspänningsprobe typ 80K-40 (instrumentnummer E-J988) med specificerad onoggrannhet 1 % och en multimeter typ Fluke 85 III (instrumentnummer E-J409) med specificerad onoggrannhet 0,7 %.

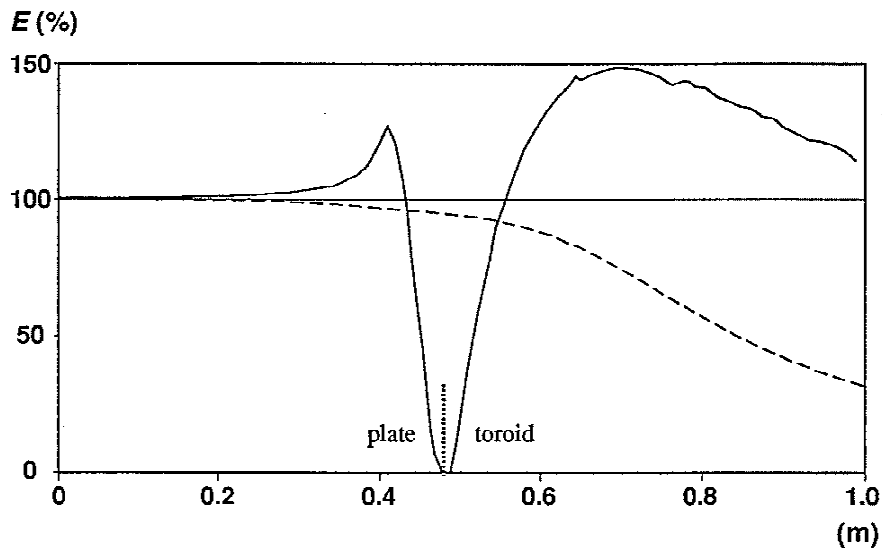
Den övre plattan anslöts till en högspänningstransformator med variabel inspänning och den undre jordades. Med detta arrangemang kunde fältstyrkan varieras mellan 0 och 25 kV/m. Fältstyrkan i gapets centrum mättes med ett E-fält instrument typ Chauvin Arnoux C.A 42 med E-fält prob EF-400.



Figur 23. Platta-platta gap för att erhålla ett homogent E-fält.



Figur 24. Den relativa fältstyrkan längs en vertikal linje genom gapets centrum. Se Figur 23.

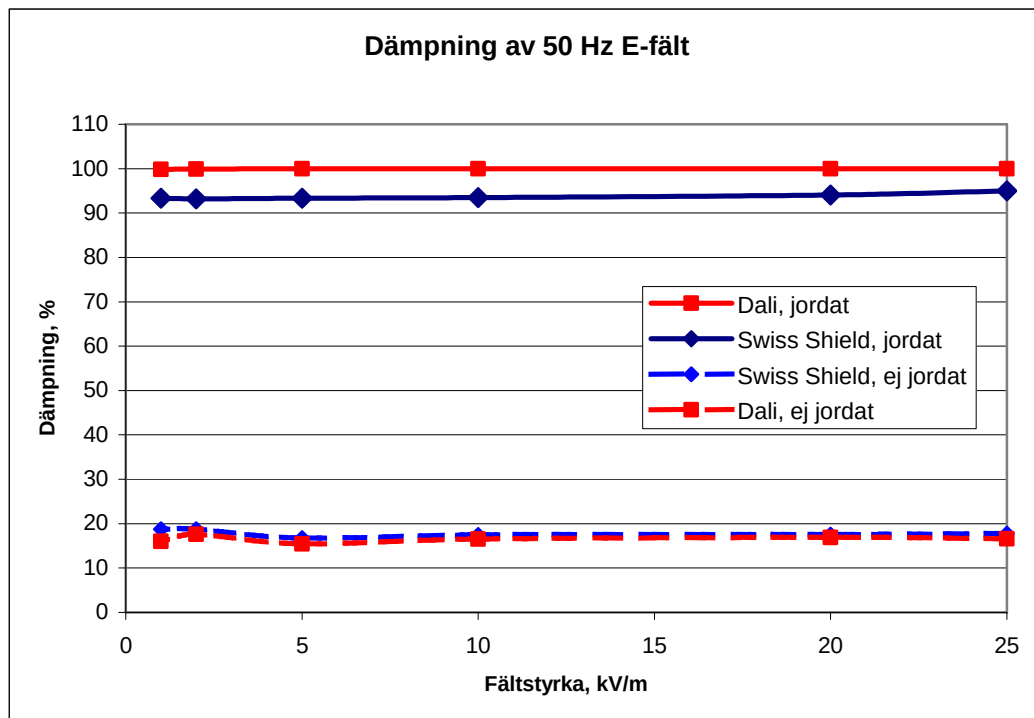


Figur 25. Den relativa fältstyrkan längs två horisontella linjer ut från gapets centrum. Den streckade kurvan visar fältstyrkan längs en linje i gapets mitt och den heldragna linjen visar fältstyrkan invid den övre plattan. Se Figur 23.

Fältstyrkan mättes utan tyg och med tyg typ *Swiss Shield* och typ *Dali*. Mätningar gjordes med respektive tyg jordat och ojordat. Provuppställningen visas i Figur 26 och resultatet framgår av Figur 27. Det framgår att båda tygerna kan dämpa det elektriska fältet med mer än 90 % om de jordas. Detta resultat får anses vara högst tillfredsställande.



Figur 26. Provuppställning för uppmätning av skärmförmåga.



Figur 27. Uppmätt skärmning av 50 Hz E-fält.

5 Diskussion och slutsatser

Gnisturladdningar och kontaktströmmar är företeelser som båda är beroende av det elektriska fältets storlek. För de förstnämnda finns ingen formell begränsning, men de kan likväl ge upphov till obehagliga och t o m smärtsamma upplevelser. För kontaktströmmar, däremot, finns en begränsning på 1,0 mA för arbetstagare och 0,5 mA för allmänheten (< 2,5 kHz).

Det har diskuterats om det är dessa företeelser som i praktiken sätter gränsen för det elektriska fält som kan accepteras i olika situationer. Insats- eller referensvärdet för elektrisk fältstyrka är 10 kV/m respektive 5 kV/m vid 50 Hz och motsvarande gränsvärde är 10 mA/m² respektive 2 mA/m². Det har på olika sätt visats att denna relation är konservativ och att sätta gränsvärden medger en betydligt högre elektriskt fältstyrka. Enkla beräkningar visar att en fältstyrka på ca 40 kV/m skulle kunna accepteras om det enda kravet är en högsta strömtäthet i kritiska organ på 10 mA/m². En så hög fältstyrka torde förvisso ge upphov till andra problem, men 20 kV/m skulle kunna vara en realistisk övre gräns för acceptabel fältstyrka. I ICNIRP Guidelines finns en skrivning om att fältstyrkan kan fördubblas från 10 kV/m till 20 kV/m, i de fall då det inte finns risk för "negativa effekter" vid kontakt med föremål på annan potential (jordade eller uppladdade). Detta undantag finns inte med i EU-direktivet som kom i april 2004 [3].

Frågan är då: Vilken betydelse har gnisturladdningar och kontaktströmmar för den fältstyrka som kan accepteras i olika situationer?

Fyra huvudfall kan studeras:

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

Det första fallet kan beräknas och studeras genom enkla experiment. Båda metoderna ger likartat resultatet. För en 2 m lång person fås maximalt 360 µA vid 20 kV/m.

Marginalen upp till 1 mA är således betryggande.

Det andra fallet kan också beräknas, men med vissa antaganden om isolationen mellan fötterna och jord. Med perfekt isolation fås en uppladdningsspänning på 3,8 kV vid 10 kV/m och 7,6 kV vid 20 kV/m.

Ovanstående spänningar motsvarar ungefär 50 %-värdet för obehag för barn respektive för män. I praktiken blir dock spänningen i allmänhet lägre p g a resistiva förlustströmmar via skosulorna till jord.

Det är bara lokalt under kraftledningar för spänningsnivåer 400 - 420 kV som barn och andra i gruppen allmänheten kan exponeras för fältstyrkor av denna storleksordning (≈ 10 kV/m). Det kritiska området är en zon mitt emellan stolparna där linorna kan hänga på minimihöjd. För att drabbas av en märkbar gnisturladdning krävs dessutom kontakt med ett jordat föremål. Givetvis kan det förekomma staketstolpar och annat jordförbundet inom denna begränsade zon, men en kontakt skall då inte kunna medföra annat än ett kortvarigt obehag.

Personer som arbetar i ställverk och i ledningsstolpar kan möjligen exponeras för fältstyrkor upp mot 20 kV/m. I dessa miljöer måste man räkna med att personerna tar i jordade föremål som stolpar, stativ etc. Dels finns här ett obehag vid kontakten mot jord och dels måste man räkna med att den obehagliga upplevelsen kan medföra att personen t ex släpper taget om en stege och faller ner.

Skor med halvledande sula förbättrar den här situationen avsevärt och rekommenderas vid arbete i ställverk. Arbetskläder med ledande foder eller dylikt minskar risken för besvärande urladdningar ytterligare.

Det tredje fallet - kontaktström från ett uppladdat föremål och till en människa - kan beräknas under vissa antaganden. I de flesta fall kan den maximala kontaktströmmen beräknas och den verkliga, lägre, uppskattas.

Generellt gäller att större föremål ger upphov till högre strömmar. Från en stor lastbil fås en högre ström än från en personbil.

I praktiken begränsas urladdningsströmmen av läckströmmar via däck till jord. Tyngre fordon har i allmänhet däck med större ledningsförmåga och risken för stora kontaktströmmar begränsas därmed avsevärt. Vägbanans resistivitet måste givetvis också beaktas. Riktigt torra grusvägar och enkla vägar av makadam skulle kunna vara ett problem i detta avseende, möjligen också grusade ytor i ställverk. Generellt uppvisar asfalt en betydligt högre ledningsförmåga än torrt grus och på vägar med asfalt bör inte kontaktströmmar vara något problem.

Det fjärde fallet slutligen - gnisturladdning mellan ett uppladdat föremål och en människa - är det som möjligen kan orsaka de största problemen. Mycket är gemensamt med det tredje fallet. Storleken har betydelse; det är bara bussar och större fordon som har förutsättning att kunna laddas upp till någon högre spänning. Samtidigt uppvisar dessa fordon en förhållandevis låg resistans till jord och uppladdningsspänningen blir i allmänhet långt under den maximalt möjliga. Mätningar med fordon på olika underlag visar att man inte i något fall får en uppladdningsspänning överstigande 50 % av det ostörda fältet. Detta innebär att man kan nå upp till ca 5 - 6 kV för en större buss parkerad parallellt med och strax utanför ytterfasen på en 400 kV luftledning. En person som tar i bussen och samtidigt har god kontakt med jord, kommer att uppleva en gnisturladdning. Barn är känsligast och ungefär 50 % av dem

kommer att uppleva kontakten som smärtsam. Möjligen kan 0,5 % av dem också passera gränsen för varaktig muskelkramp.

Gnisturladdningar kan givetvis också drabba dem som arbetar i ställverk och liknande miljöer med särskilt hög fältstyrka. Problemen är dock lättare att hantera än de som kan uppstå på allmänna platser. Vid uppställning av fordon och större föremål som containrar o dylikt i ställverk, bör platser med särskilt hög fältstyrka undvikas. Fasta föremål bör jordas och fordon förses lämpligen med en "släpande jord", dvs en kortare kätting som får släpa under fordonet.

Det kan sammanfattningsvis konstateras att varken gnisturladdningar eller kontaktströmmar bör orsaka några större problem eller obehag i sådana miljöer som allmänheten har tillträde till. Risken är förvisso större i ställverk och på liknande arbetsplatser, men där kan å andra sidan problemen hanteras enklare genom användning av skor med halvledande sula och genom jordning av fordon och uppställda föremål.

Genom användning av lämpliga arbetskläder och genom att på olika sätt minska risken för uppladdning av fordon och föremål, ges det förutsättningar för att i vissa fall öka den högsta acceptabla fältstyrkan från 10 till 20 kV/m, om man kan visa att det korresponderande gränsvärdet på 10 mA/m² inducerad ström i kroppen inte överskrids.

6 Referenser

- 1 ICNIRP Guidelines. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electro-magnetic fields (up to 300 GHz). Health Physics April 1998, Volume 74, No 4. pp 494 – 522.
- 2 RÅDETS REKOMMENDATION av den 12 juli 1999 om begränsning av allmänhetens exponering för elektromagnetiska fält (0 Hz –300 GHz) (1999/519/EG)
- 3 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)
- 4 Dawson, Trewor W; Caputa, Kryz and Stuchly, Maria A: A comparison of 60 Hz uniform magnetic and electric induction in the human body. Physics in Medicine and Biology. Vol 42. 1997. pp 2319-2329.
- 5 Dawson, Trewor W; Caputa, Kryz and Stuchly, Maria A: High-Resolution Organ Dosimetry for Human Exposure to Low-Frequency Electric Fields. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol 13. No 2. April 1998. pp 366-373.
- 6 Dimbylow, P J: Current densities in a 2 mm resolution anatomically realistic model of the body induced by low frequency electric fields. Physics in Medicine and Biology. Vol 45. 2000. pp 1013-1022.
- 7 Dimbylow, Peter: Development of the female voxel phantom, NAOMI, and its applications 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.
- 8 Methods for calculating the current density and internal electric field induced in the human body by electric or magnetic fields in the low and intermediate frequency range. Part 3: Electric field. IEC Draft 62226-31-1:2004. 106/72/NP.
- 9 IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human exposure to Electromagnetic Fields, 0 - 3 kHz. IEEE Std C95.6:2002

- 10 Dalziel; Charles F.: Electric shock hazard. IEEE Spectrum Feb 1972. pp 41-50.
- 11 Transmission Line Reference Book. 345 kV and Above. Second Edition. Prepared by Project UHV. 1982
- 12 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.
- 13 Protection of workers from power frequency electric and magnetic fields. Occupational Safety and Health Series No 69. International Labour Organization 1994.
- 14 Schutz vor niederfrequenten elektrischen Feldern der Energieversorgung und anwendung. Berichte der Strahlenschutzkommission (SSK) des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Heft 7, 1997.
- 15 Reilly, J. Patrick: Applied Bioelectricity. From Electrical Stimulation to Electropathology. Springer – Verlag. 1998.
(Referensen avser ett avsnitt i kapitel 8, "Skeletal Muscle Response to Electrical Stimulation", som skrivits av James D Sweeney.)
- 16 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.
- 17 Dawson, Trewor W; Caputa, Krys and Stuchly, Maria A: High-Resolution Organ Dosimetry for Human Exposure to Low-Frequency Electric Fields. IEEE Transactions on Power. Delivery. Vol 13. No 2. April 1998. pp 366-373.
- 18 Johanna Fracke och Jenny Åke: Magnetiska och elektriska fält i ställverksmiljö: Kartläggning av en äldre anläggning. Examensarbete 2004:17. Chalmers Lindholmen University College.
- 19 Kaune, W T and Phillips, R D: Comparison of the Coupling of Grounded Humans, Swine and Rats to Vertical, 60-Hz Electric Fields. Bioelectromagnetics 1. 1980. pp 117-129.
- 20 Lövstrand, Karl Gunnar och Bergström, Sven: Exposition för elektriska fält. En kartläggning av den elektrofysikaliska arbetsmiljön i ställverk. Arbete och Hälsa. Vetenskaplig skriftserie. 1980:4.

- 21 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

- 22 Reilly, J Patrick: Electric field induction on long objects – A Methodology for transmission line impact studies. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol PAS-98. No 6. Nov/Dec 1979. pp 1841-1852.

- 23 Dawson, T W, Caputa, K, Stuchly, M A and Kavet R: Electric fields in the human body resulting from 60-Hz contact currents. IEEE Transactions on Biomedical Engineering. Vol 48. Sep 2001. pp 1020-1026.

- 24 Sastre Antonio and Kavet, Robert: Candidate sites of action for micro-dosimetry associated with exposure to extremely-low-frequency magnetic fields, electric fields and contact currents. Health Physics 83 (3). pp 387-394. Sep 2002.

- 25 Dawson, Trevor W: Caputa, Krzysztof; Stuchly, Maria A and Kavet Robert: Pacemaker Interference by 60-Hz Contact Currents. IEEE Transactions on Biomedical Engineering. Vol 49. No 8. Aug 2002. pp 878-886.

- 26 El-Sherif, Adib: Elektrisk influens på fordon under kraftledning. Rapport nr XR-EE-ETK 2006:012.
Examensarbete vid Avdelningen för elektroteknisk teori och konstruktion, KTH. 2006.

- 27 Cedergren, Jonas: Human contact currents induced by electrical field in Swedish 400 kV substations. Report no EX 070/2006.
Examensarbete vid Department of Signals and Systems, CTH. 2006.

- 28 RTK AB. Granberga 9. 186 91 Vallentuna.
E-post: info@rtk.se
Hemsida: <http://.rtk.se>

- 29 ELRO. Lövåsvägen 3A. 516 77 Målsryd.
E-post: elro@post.utfors.se
Hemsida: <http://www://elro.nu>