

Mätning av inducerade strömmar vid exponering för radiofrekventa fält

Jonna Wilén,¹ Gert Anger,² Kjell Hansson Mild¹ och Lars-Erik Paulsson²

1. Arbetslivsinstitutet, Umeå
2. Statens strålskyddsinstitut, Stockholm

ARBETSLIVSRAPPORT NR 2000:3

ISSN 1400-8211 <http://www.niwl.se/arb/>

Programmet för teknisk yrkeshygien
Programchef Ulf Landström



Arbetslivsinstitutet

Förord

Detta är slutrapporten från det av Statens strålskyddsinstitut finansierade projektet "Mätning av ström hos personer exponerade för radiofrekventa elektromagnetiska fält" Dnr: 411/869/95. Projektet har genomförts som en del av ett doktorandarbete vid Arbetslivsinstitutet. Författarna vill tacka Kjell Hollström som byggt upp anläggningen vid Arbetslivsinstitutet. Ett stort tack även till Janez Marenko, Arbetarskyddsstyrelsen, som deltagit vid fältmätningarna, Nils Blix och Bertil Nordström, Arbetslivsinstitutet, som hjälpt till vid mätningarna i anläggningen på Arbetslivsinstitutet. Avslutningsvis vill vi tacka alla försökspersoner som ställt upp vid mätningarna.

Umeå i mars 2000.

Kjell Hansson Mild
Projektledare

Innehållsförteckning

Sammanfattning	1
Inledning	2
Material och metoder	2
Fältmätning	3
HF dipolen	4
VHF dipolen	4
Laborativ mätning (ALI)	5
Laborativ mätning (SSI)	6
Resultat	7
Fältmätningen	7
HF dipolen	7
VHF dipol	8
Inducerad ström.	9
Laboratoriemätning (ALI)	11
Elektriskt fält	11
Inducerad ström	11
Jämförelse mellan instrumenten	13
Laborativ mätning (SSI)	16
Jämförelse med Gandhis teori	18
Jämförelse mellan Narda och Holaday instrumenten	19
Diskussion	23
Avslutande kommentarer	24
Summary	25
Referenser	26
Appendix A (HF- och VHF dipolerna)	27
Appendix B (Lab. mätning ALI)	35

Sammanfattning

Vid utrustning som avger radiofrekventa fält kommer strömmar att induceras i operatörens kropp. Tidigare har man försökt begränsa strömmarna genom att införa gränsvärden för elektrisk och magnetisk fältstyrka i luft. Det har dock visat sig att trots att dessa gränsvärden är uppfyllda, kan strömmar i på ett par hundra miliampere induceras i kroppen, vilket är så högt att termiska effekter ej kan uteslutas. International Commission on Non Ionizing Radiation (ICNIRP 1998) har i sin senaste utgåva förutom referensvärden för elektrisk och magnetisk fältstyrka även infört riktlinjer för inducerad ström. Det finns planer hos Arbetarskyddsstyrelsen att anta dessa rekommendationer vilket gör mätningar av inducerade strömmar nödvändiga.

Vi har i detta projekt undersökt storleksordningen på den inducerad strömmen och mätproblematiken förknippad med detta. Detta har vi dels gjort vid fältmätningar vid VHF och HF-dipoler, men också på laboratoriet, där vi konstruerat en stripline (2,4*3*6 meter), symmetrisk över jord, för att på så sätt skapa en helkroppsexponeringssituation där homogena elektriska fält med hudvkomponenten i vertikalled kan skapas. Två olika typer av kommersiella strömmätningssinstrument har använts, dels ett antal planparallella strömmätare som mäter strömmen som går från fotsulorna ner till jord, dels ett par strömprober som mäter strömmen genom ena ankeln. Både jordade och icke jordade förhållanden har studerats, det senare uppnåddes genom att en träpall med tjockleken 17 cm placerades mellan fötterna och jordplanet. Alla mätningar har gjorts både då försökspersonen bär skor och står barfota direkt på mätinstrumentet. Mätningarna har gjorts på ett antal frekvenser i området 3-50 MHz. Totalt medverkade tio försökspersoner, alla med olika längd och vikt, vilket också har tagits hänsyn till i utvärderingen.

Resultatet visar bland annat att instrumenten ger olika mätresultat vid samma mätbetingelser. Vid jordade förhållanden mäter de olika mätinstrumentet likvärt, men vid icke-jordade förhållanden är skillnaden upp till fem gånger. Skillnaden var mest påtagbar då planparallella strömmätare jämförs med strömprober. Detta beror framförallt på att den till ytan större planparallella strömmätaren ger en större kapacitans än en strömprobe, där endast fotsulorna utgör ytan mot jord.

Eftersom ICNIRP kräver mätningar på inducerade strömmar, är det viktigt att reda ut mätproblematiken kring detta och tydligt beskriva hur strömmätningar ska genomföras.

Nyckelord

Mätmetoder, limtorkar, plastsvetsar, radiofrekventa elektromagnetiska fält

Inledning

Vid utrustning som avger radiofrekventa fält (RF), speciellt vid plastsvetsmaskiner och limtorkar, kommer det att induceras strömmar i operatören. I dag begränsas arbete vid sådan utrustning av gränsvärden för det elektriska och magnetiska fältstyrkorna enligt Arbetarskyddsstyrelsens författningssamling "Hörfrekventa elektromagnetiska fält" (Arbetarskyddsstyrelsen 1987). Det är känt att trots att de elektriska och den magnetiska fältstyrkorna underskrider gällande gränsvärden, kan de i kroppen inducerade strömmarna vara så höga att oönskade termiska effekter uppstår. Det finns emellertid internationella rekommendationer (ICNIRP 1998) som även begränsar inducerade strömmar i kroppen; planer finns hos Arbetarskyddsstyrelsen att anta dessa rekommendationer.

Syftet med föreliggande projekt var att undersöka vilka strömmar som induceras i kroppen vid exponering för RF och problematiken vid mätningar av dessa. I dag finns flera kommersiella instrument på marknaden och det är därför av intresse att undersöka hur väl dessa mäter och vilka problem som kan vara relaterade till mätinstrumenten.

Projektet har genomförts i tre delar: en fältmätning vid kortvågssändare och två laborativa mätningar; den första vid en provisorisk uppställning vid Statens strålskyddsinstitut (SSI) i Stockholm, den andra vid en uppbyggd anläggning vid Arbetslivsinstitutet, Umeå.

Material och metoder

Både vid fältmätningen och den laborativa mätningen har Holaday HI-4433-HSE (frekvensområde 0,5 MHz - 1,5 GHz) använts för mätning av elektrisk fältstyrka. Fältstyrkan har mätts i det ostörda fältet.

Inducerad ström i kroppen har registrerats med *Narda* 8850 (frekvensområde 3 kHz - 110 MHz, mätyta: 8,4 dm²) och *Holaday* HI-3701 (frekvensområde 3 kHz - 100 MHz, mätyta: 17,5 dm²). Vid vissa mätningar har även *GC-2* (Gandhis prototyp för inducerade strömmätningar, mätyta 8,4 dm²) använts och *Eaton* Current Probe (94606-1). Även *Holadays* strömprobe (*HI3702*) har använts vid enstaka mätningar. De tre först nämnda instrumenten är s.k. planparallella strömmätare som mäter strömmen som transporteras från fötterna till jord och de två senare är s.k. strömprober som mäter strömmen som passerar genom den ena ankeln (se figur 1). Vid de två senare måste strömmen genom varje ben adderas.

Den i kroppen inducerade strömmen har mätts då personen står i upprätt position, på en förhand definierad mätposition och med armarna ned längs sidorna. Strömmen har mätts vid såväl jordade förhållanden (personen står på mätinstrumentet som är i direkt kontakt med markytan), som vid icke-jordade förhållanden (personen står på mätinstrumentet som är placerad på en träpall med tjockleken 17 cm). Detta har gjorts både då personen är

barfota och då personen använder skor. Vid den laborativa mätningen vid ALI deltog försökspersonerna P1-P4, P6 och P9-P11. Vid mätningen på SSI, deltog försökspersonerna P1 och P4-P8. De personer som deltog vid fältmätningen var P1 och P4-P7. Information om försökspersonerna ges i tabell 1.



Figur 1. Vänster: Planparallell strömvåg (Holaday HI3701), höger: strömprobe (Eaton 94606-1)

Vid de båda fältmätningarna och laboratiemätningen vid SSI var fältförhållandena komplicerade och den elektriska fältstyrkan inhomogen. Vid laboratiemätningen vid Arbetslivsinstitutet i Umeå kan vi anta att det elektriska fältet var mer fjärrfältlika med en dominerande komponent i vertikalled.

Tabell 1. Information om försökspersonerna som deltog dels vid laborativa mätningen, dels vid fältmätningen.

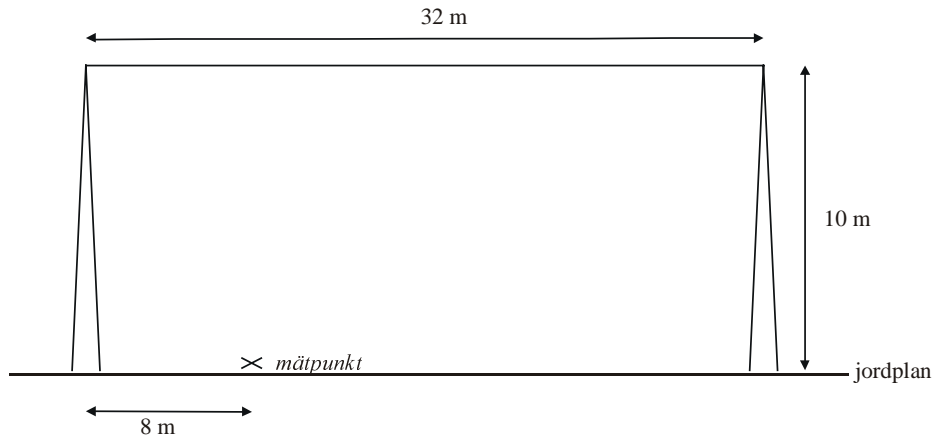
person	längd [cm]	vikt [kg]	skosula, labmätn. (ALI)	skosula, labmätn. (SSI)	skosula, fältmätn.
P1	182	75	gummisula 2 cm	gummi, 4 cm klack	gummi, 4 cm klack
P2	179	68	gummisula 2 cm	---	---
P3	165	80	gummisula 2 cm		
P4	185	90	gummisula 2 cm	gummisula 2cm	plastsula
P5	171	70	---	tunn läder	tunn läder
P6	177	125	gummisula 2 cm	gummisula	gummisula
P7	188	86	gummisula 2 cm	träsko	gummisula
P8	155	47	---	tunn läder	---
P9	178	70	gummisula 2,5 cm	---	---
P10	173	60	gummi/lädersula 2 cm	---	---
P11	176	72	gummisula 2 cm	---	---

Fältmätning

Mätningar gjordes på två olika ställen, dels vid en horisontell balanserad HF dipol, dels vid en vertikal VHF dipol. I båda fallen lades ett hönsnät på marken under strömmätaren för att skapa bättre jordade förhållanden.

HF dipolen

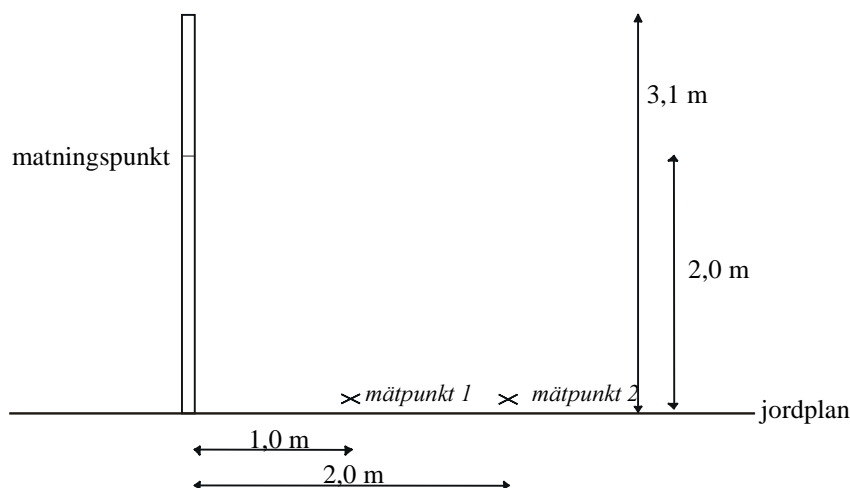
Vid HF dipolen (se figur 2) gjordes mätserier där det totala E-fältet, som har sin huvudkomponent i vertikalled, och de i kroppen inducerade strömmarna noterades vid frekvenserna 13,56, 20,5 och 27,12 MHz. Sändarens uteffekten vid dessa var 600 W, 390 W resp. 280 W. Detta gjordes för fem testpersoner som upprepade proceduren med och utan skor. Testpersonerna stod så raka och stilla som möjligt på strömmätaren och avläste själv den inducerade strömmen.



Figur 2. Mastdimensioner och mätuppställning vid HF dipolen.

VHF dipolen

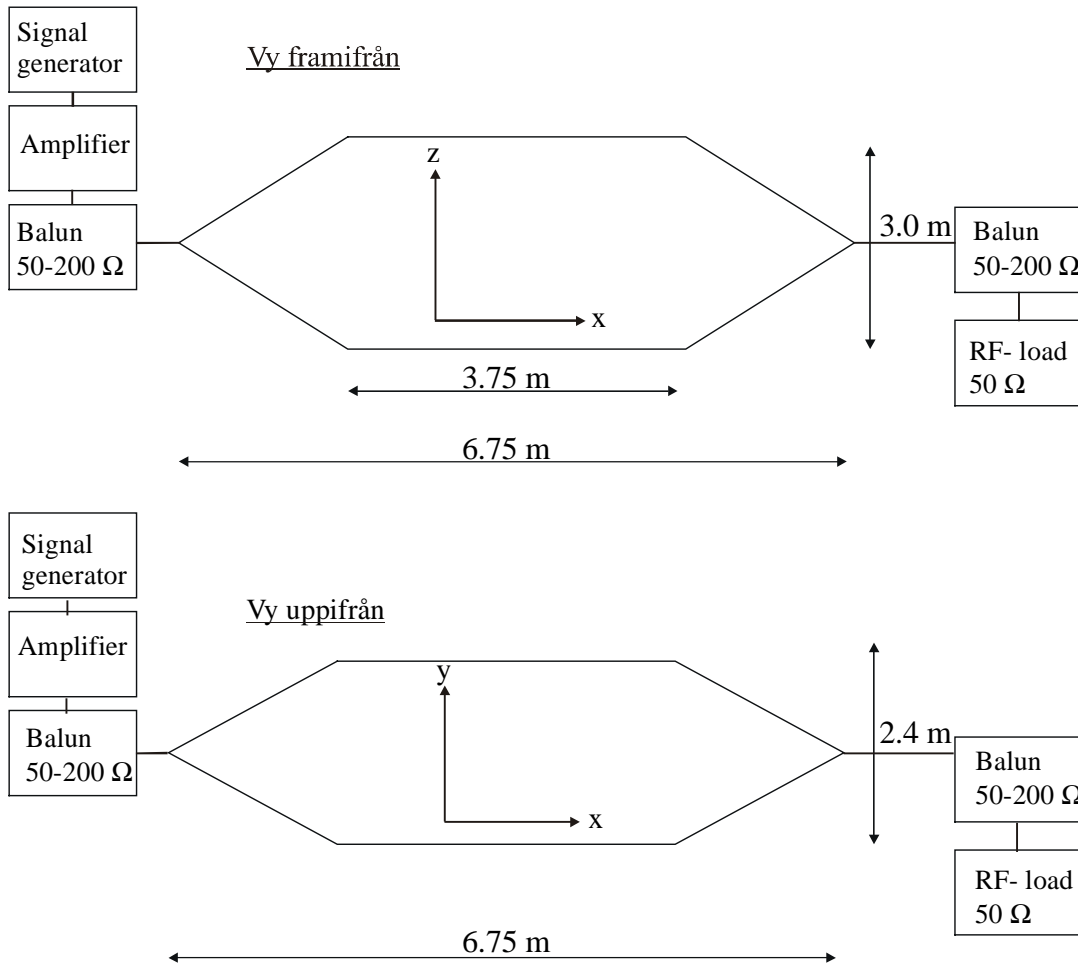
Mätningarna genomfördes på samma sätt som vid HF dipolen och gjordes vid två olika avstånd från antennen (1 respektive 2 meter). Detta genomfördes vid frekvenserna 32,0 MHz, 36,0 MHz, 40,7 MHz resp. 50,0 MHz. Antennen var mobil och kopplad till en militär bandvagn, vars UKV-radio användes som sändare. Antennens dimensioner ges i figur 3.



Figur 3. Mastdimensioner och mätuppställning vid den mobila VHF dipolen.

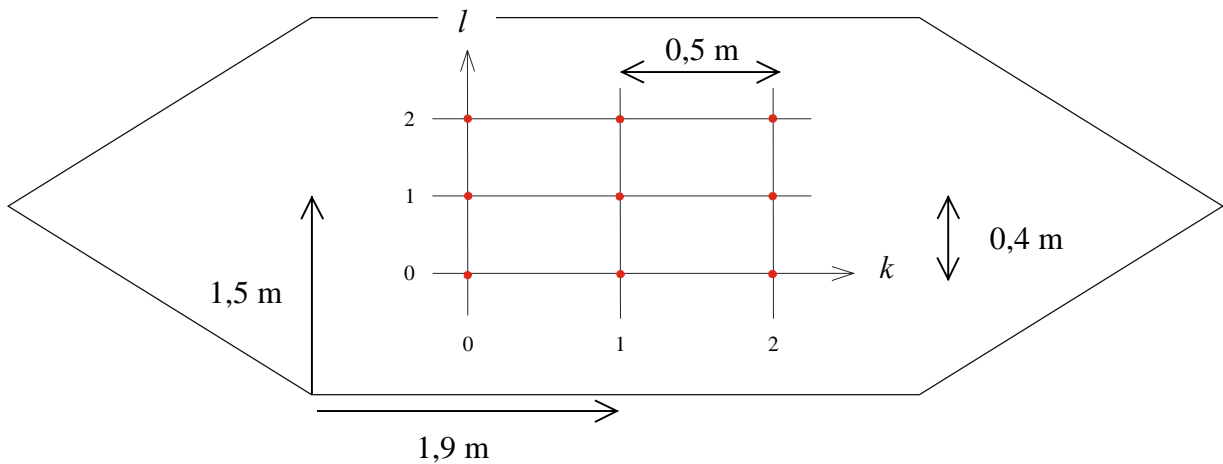
Laborativ mätning (ALI)

Vi har konstruerat en stripline, dimensionerad för att skapa homogena radiofrekventa fält för helkroppsexponering (Whitson 1973). Anläggningen är uppbyggd som en träkonstruktion, klädd med aluminium folie av tjockleken 0,13 mm. Skarvar är tejpade med aluminiumtejp med högledande fästämne. Anläggningen är symmetrisk över jord med en karaktäristisk impedans på 200Ω . I varje ände monterades tvåstegsbaluner (Fabr Fritzel, viktad dipol 1:4). Se figur 4 för vidare information.



Figur 4. Skiss på exponeringsanläggningen, vy framifrån respektive uppifrån.

Med en E-fältssond, monterat på ett stativ, mättes den elektriska fältstyrkan i x, y respektive z-riktning i angiven mätvolym (se figur 5). Mätpunkterna anges som $(x,y) = (k,l)$ vid en viss höjd (z). Även resultanten uppmättes ($E_t^2 = E_x^2 + E_y^2 + E_z^2$).



Figur 5. Schematisk skiss över mätpunkterna för elektrisk fältmätning

Vi har mätt den inducerade strömmen för ett antal försökspersoner vid olika frekvenser (3-27 MHz). Alla mätningar har genomförts vid ett fixt värde (10 V/m) på det elektriska fältet i referenspunkten (1,1) vid en meters höjd.

Laborativ mätning (SSI)

För att erhålla ett så homogent radiofrekvent fält som möjligt, riggades en provisorisk E-fälts antenn upp på SSI. Den bestod av ca en meter breda kycklingnät, varav ett av dem låg på golvet och den andra spikades upp i taket, 2,1 meter över golvytan. Näten anslöts via triangulära aluminiumfolie remsor till en $50 \Omega/20 \text{ W}$ belastning i änden på en 4 m RRG213 kabel från utgången på Boonton effektförstärkare som matades med en HP 8656B signalgenerator

Först gjordes en E-fältsmätning i vertikalled från golv (jord) till två meters höjd. Mätpunkterna sattes med inbördes avståndet 2 dm. Därefter mättes de kroppsinducerade strömmarna för sex olika försökspersoner, med och utan skor. Detta gjordes vid den punkt där E-fältet uppmätts. Kroppsströmmarna registrerades med Holaday respektive Narda instrumenten. Mätningar genomfördes vid två frekvenser (13,56 resp. 27,12 MHz).

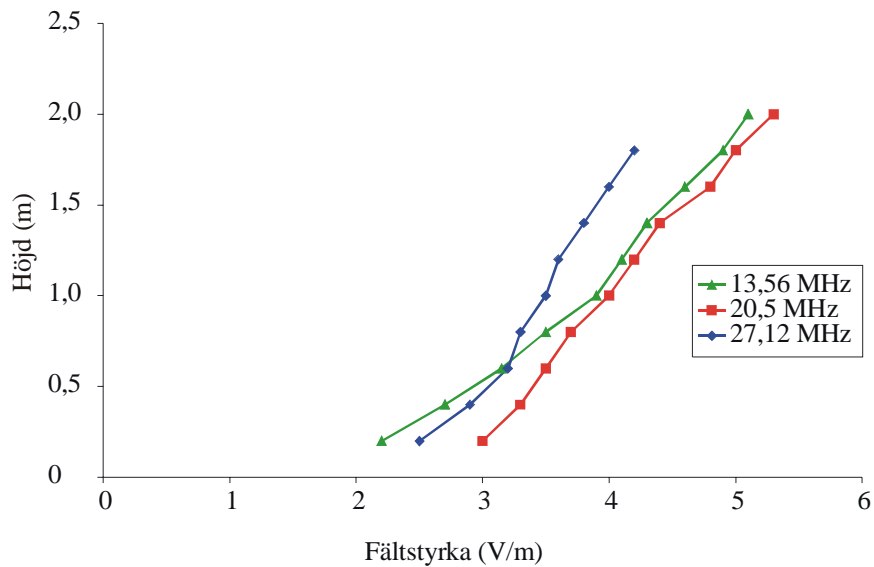
Även en mätserie då träskivor av olika tjocklek placerades under mätinstrumenten genomfördes vid 27,12 MHz. Detta för att simulera icke-jordade förhållanden.

Resultat

Fältmätningen

HF dipolen

Fältstyrkan vid olika höjd över marken vid kortvågsantennen presenteras i figur 6. Statistik över dessa mätningar visas i tabell 2. Fältstyrkan mättes från 0,2 till 2 meters höjd, totalt 10 mätningar för respektive frekvens.



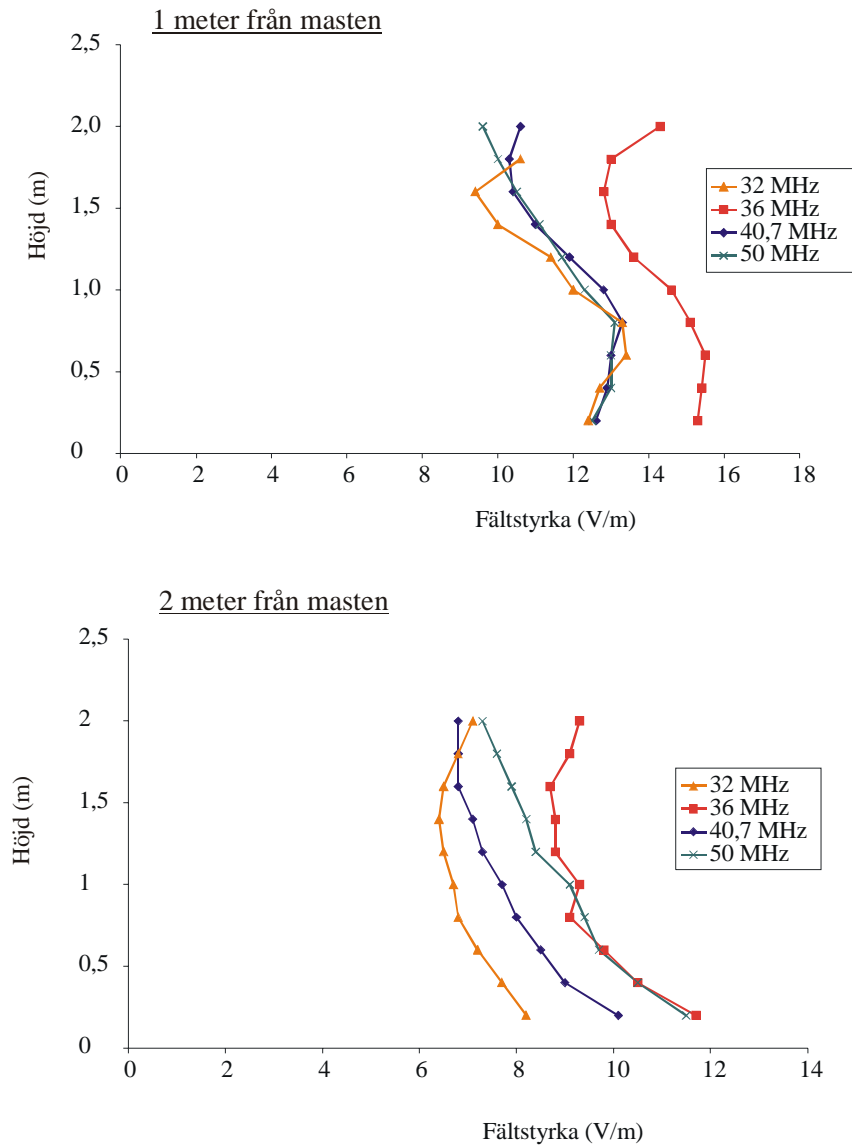
Figur 6. Elektrisk fältstyrka vid olika höjd över marken (HF dipolen).

Tabell 2. Statistik över E-fältmätningen (V/m), HF dipolen, 10 mätningar (fördelade på höjden 0,2-2,0 m). Spridningen i medelvärdet är angivet som standardavvikelse.

	13,56 MHz	20,5 MHz	27,12 MHz
medelvärde	$3,6 \pm 0,5$	$4,1 \pm 0,7$	$3,9 \pm 0,9$
maxvärde (höjd)	4,6 (2 m)	5,3 (2 m)	5,1 (2 m)
minvärde (höjd)	2,5 (0,2 m)	3,0 (0,2 m)	2,2 (0,2 m)

VHF dipol

Fältstyrkan mättes på en respektive två meters avstånd från antennen och mätningarna gjordes från 0,2 till 2 meters höjd (10 mätningar) för varje frekvens. Fältstyrkan vid olika höjd över marken presenteras i figur 7. Statistik över dessa mätningar visas i tabell 3



Figur 7. Elektrisk fältstyrka vid olika höjd över marken, vid en respektive två meters avstånd från masten.

Tabell 3. Statistik över E-fältsmätningen (V/m), VHF dipolen, 10 mätningar (fördelade på höjden 0,2-2,0 m). Spridningen i medelvärdet är angivet som standardavvikelse.

1 meter från masten

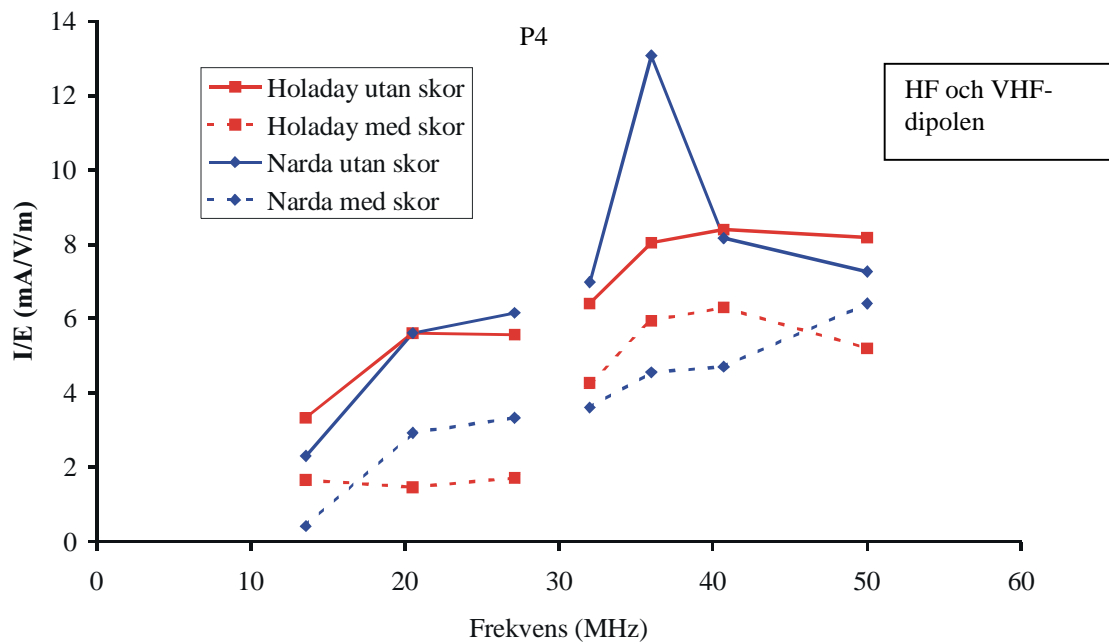
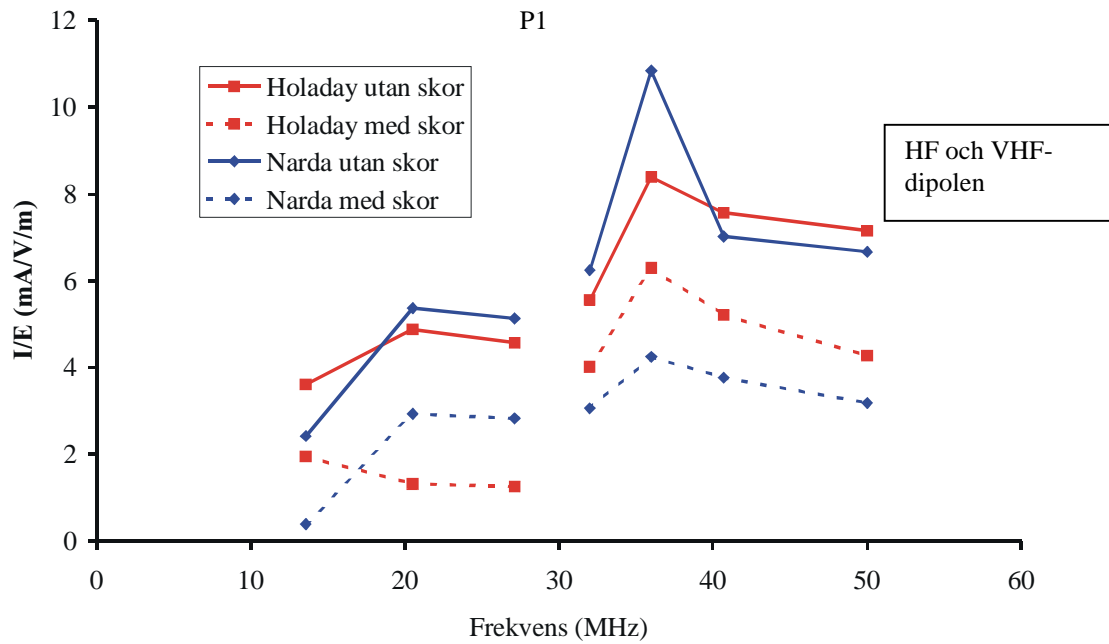
	32 MHz	36 MHz	40,7 MHz	50 MHz
medelvärde (V/m)	12 ± 1,4	14 ± 1,1	12 ± 1,2	12 ± 1,3
maxvärde (höjd/m)	13 (0,6 m)	16 (0,6 m)	13 (0,8 m)	13 (0,8 m)
minvärde (höjd/m)	9,4 (1,6 m)	13 (1,6 m)	10 (1,8 m)	9,6 (2 m)

2 meter från masten

	32 MHz	36 MHz	40,7 MHz	50 MHz
medelvärde (V/m)	7,0 ± 0,6	9,5 ± 0,9	7,8 ± 1,1	9,0 ± 1,3
maxvärde (höjd/m)	8,2 (0,2 m)	12 (0,2 m)	10 (0,2 m)	12 (0,2 m)
minvärde (höjd/m)	6,4 (1,4 m)	8,7 (1,6 m)	6,8 (1,6-2 m)	7,3 (2 m)

Inducerad ström.

Kvoten mellan inducerad ström (I) och medelvärdet av den elektriska fältstyrkan (E) som funktion av längden för två av försökspersonerna (P1 och P4) anges i figur 8 för Holaday och Narda instrumentet vid mätning med respektive utan skor. Resultat för övriga försökspersoner presenteras i Appendix A. Diagrammen anger resultaten både för HF dipolen (13,56-27,12 MHz) och VHF dipolen (32-50 MHz). Den inducerade strömmen presenteras i tabellform i Appendix A, där det även finns ytterligare diagram där I/E presenteras som funktion av längden.



Figur 8. I/E (mA/V/m) som funktion av frekvensen för Holaday och Narda instrumentet, med respektive utan skor. Diagrammen visar mätresultatet för respektive person (P1 och P4). Brottet i diagrammen markerar de olika mättillfällena (HF-dipolen 13,56-27,12 MHz och VHF-dipolen 32-50 MHz).

Laboratorie mätning (ALI)

Elektriskt fält

Resultaten av mätningarna av den elektriska fältstyrkan presenteras i tabell 4. Där de olika mätpunkterna och mätriktningar anges av figur 5. Detaljerad information från E-fältsmätningarna ges i Appendix B.

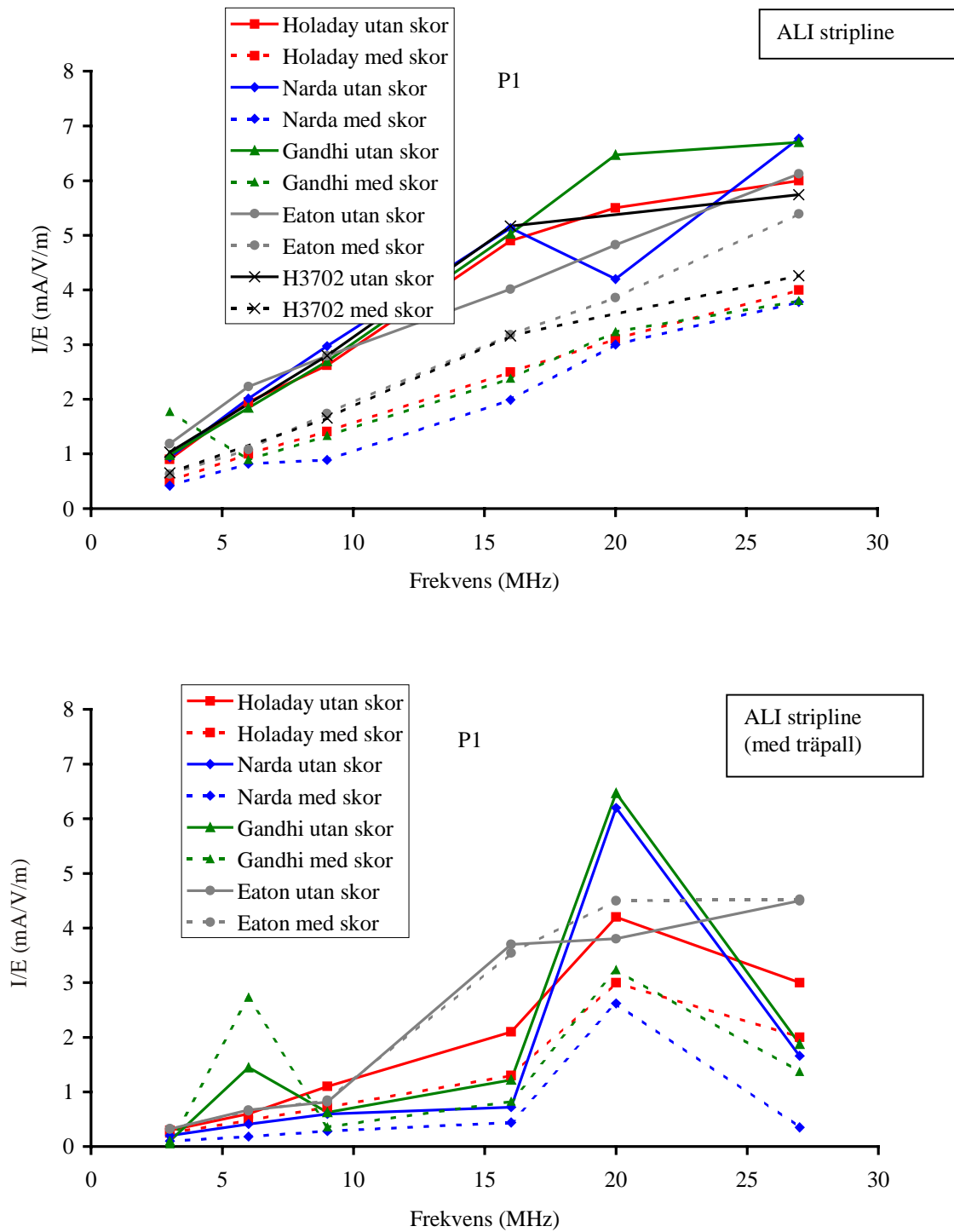
Tabell 4. Elektrisk fältstyrka vid aktuella frekvenser (V/m). E_t anger det totala fältet, E_x , E_y och E_z anger fältet i respektive riktning (enligt figur 5).

	6 MHz			9 MHz			16 MHz			27 MHz		
	medel	max	min	medel	max	min	medel	max	min	medel	max	min
E_t	11	13	10	9,4	11	8,4	8,8	11	7,3	13	17	8,6
E_z	11	13	10	9,3	11	8,4	8,6	11	7,2	12	16	7,6
E_y	0,9	1,8	0	0,8	2,3	0	1,7	2,9	0,9	4,3	6,5	1,8
E_x	0,3	0,6	0	0,6	0,8	0	1,1	1,8	0,5	1,1	3,5	0

Inducerad ström

Den inducerade strömmen uppmättes för de båda kommersiella mätinstrumenten (se Appendix B) med respektive utan skor vid ojordade förhållanden (träpall under mätinstrumentet). Detta gjordes för sju olika försökspersoner (P1-P7) vid olika frekvenser.

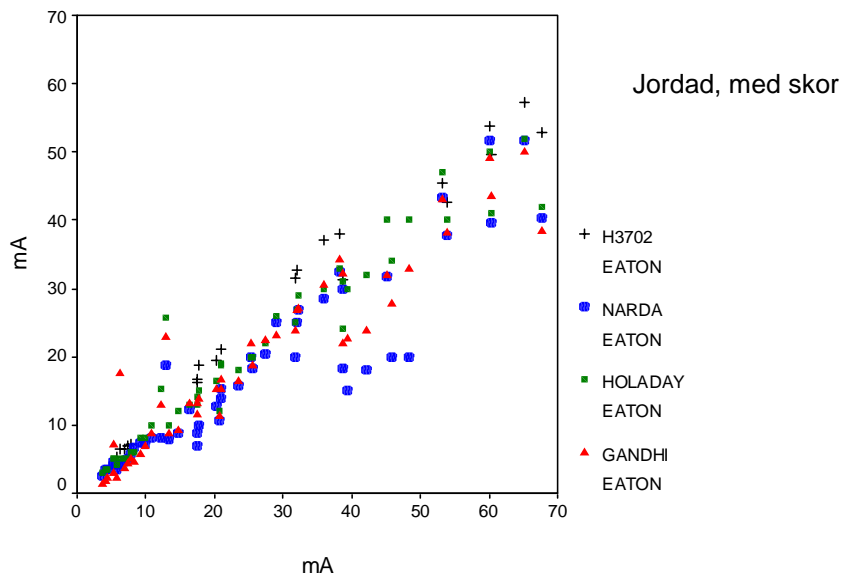
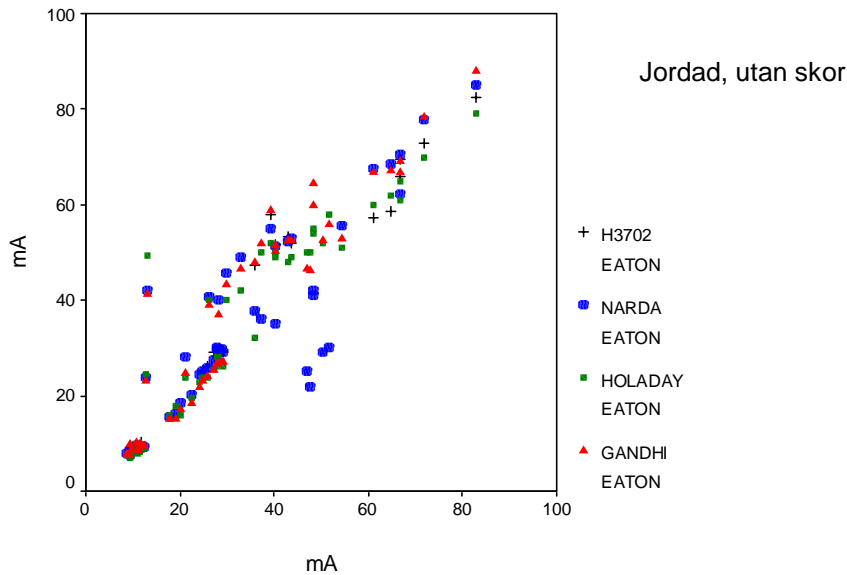
Genom att normalisera för det elektriska fältet, dvs. I/E (mA/V/m), kan utfallet vid olika frekvensers jämföras. Mätningarna vid jordade respektive icke-jordade förhållanden presenteras i figur 9 för en av försökspersonerna. I Appendix B redovisas resultat för övriga försökspersoner. Som elektrisk fältstyrka (E) har medelvärdet av totalfältet (E_t) använts (tabell 4).



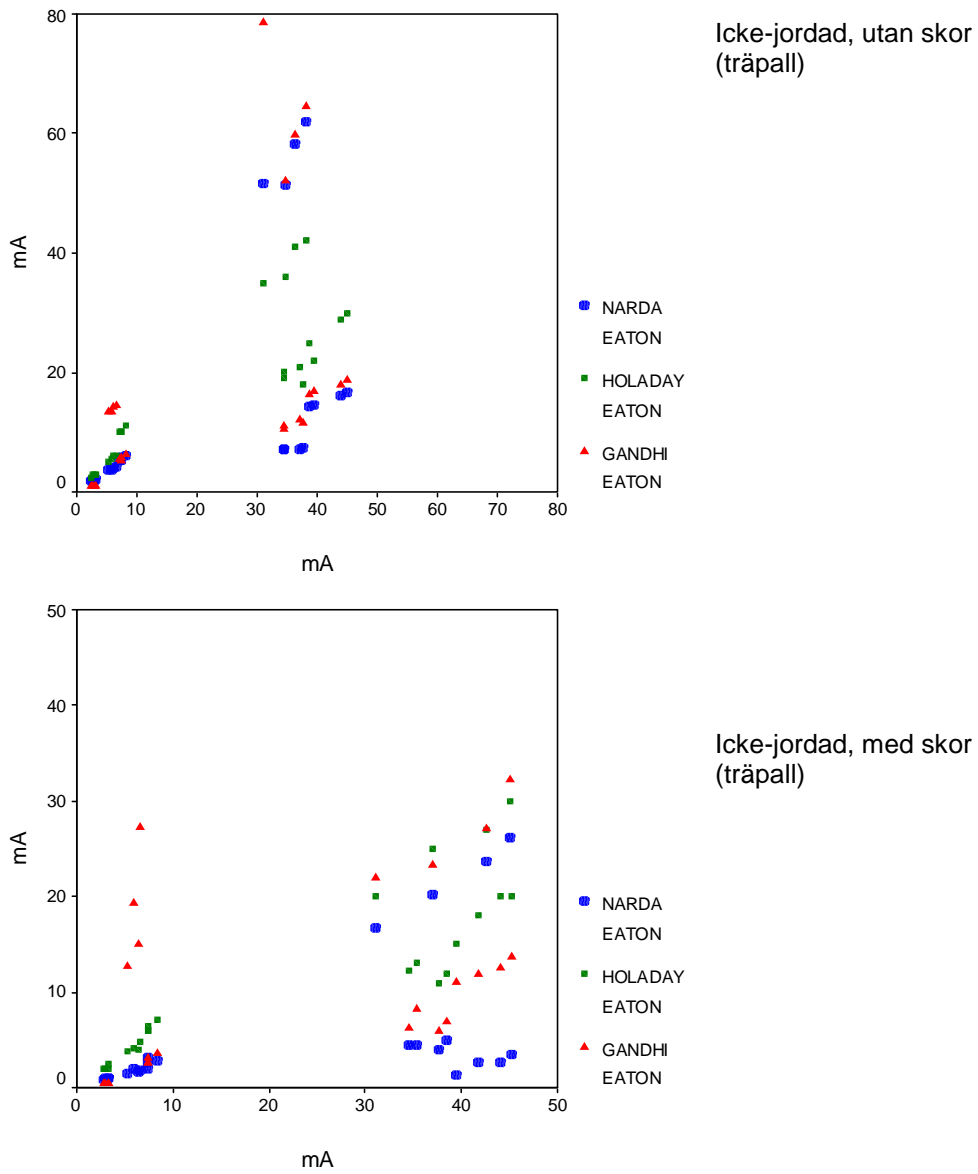
Figur 9. I/E (mA/V/m) som funktion av frekvensen för försöksperson (P1) vid jordade respektive icke-jordade förhållanden vid den laborations mätningen (ALI).

Jämförelse mellan instrumenten

I figur 10 och 11 presenteras en jämförelse mellan Eaton instrumentet (summan av strömmen genom båda benen) och de övriga instrumenten (GC-2, Narda, Holaday och H3702 (den senare endast vid jordade förhållanden)). Detta görs vid jordade respektive icke-jordade (träpall under mätinstrumentet), med och utan skor. Resultatet avser alla mätningar oavsett frekvens vid ALIs stripline.



Figur 10. Jämförelse mellan Eaton instrumentet och övriga mätinstrument (Holaday, Narda, GC-2 och H3702). I båda diagrammen representeras Eaton instrumentet av x-axel de övriga av y-axeln i enheten mA. Jordade förhållanden, med och utan skor.



Figur 11. Jämförelse mellan Eaton instrumentet och övriga mätinstrument (Holaday, Narda, GC-2 och H3702). I båda diagrammen representeras Eaton instrumentet av x-axeln och de övriga av y-axeln i enheten mA. Icke-jordade förhållanden, med och utan skor

Linjär regressionsanalys med formeln $y = kx + m$, för inducerad ström uppmätt med de olika mätinstrumenten, där x är oberoende variabeln (Eaton) och y utgör de övriga mätinstrumenten (Holaday, Narda, GC-2 resp. H3702) ges i tabell 5. Om instrumenten visar lika innebär det att $k = 1$ och $m = 0$.

Tabell 5. Linjär regressionsanalys för inducerad ström uppmätt med respektive mätinstrument. Eaton instrumentet har genomgående använts som oberoende variabel (x) och de övriga (Holaday, Narda, GC-2 resp. H3702) som beroende variabel (y), vid jordade respektive icke-jordade (träpall) förhållanden. $p(k)$ resp. $p(m)$ anger signifikansnivån för koefficienten k respektive konstanten m .

Jordade förhållanden						
Med/utan skor	Mätinstrument	Koefficient (k)	$p(k)$	Konstant (m)	$p(m)$	
Utan skor	Holaday	1,0	0,000	2,5	0,241	
	Narda	0,9	0,000	3,2	0,265	
	GC-2	1,1	0,000	1,1	0,604	
	H3702	1,0	0,000	1,7	0,568	
Med skor	Holaday	0,7	0,000	1,7	0,061	
	Narda	0,7	0,000	0,3	0,790	
	GC-2	0,7	0,000	1,6	0,151	
	H3702	0,8	0,000	2,7	0,027	

Icke-jordade förhållanden (träpall)						
Med/utan skor	Mätinstrument	Koefficient (k)	$p(k)$	Konstant (m)	$p(m)$	
Utan skor	Holaday	0,7	0,000	2,9	0,212	
	Narda	0,6	0,006	1,4	0,799	
	GC-2	0,7	0,011	4,7	0,471	
	H3702	-	-	-	-	
Med skor	Holaday	0,4	0,000	1,6	0,241	
	Narda	0,2	0,008	0,5	0,812	
	GC-2	0,3	0,027	5,7	0,065	
	H3702	-	-	-	-	

En jämförelse mellan medelvärdet av den inducerade strömmen för de olika försökspersonerna vid mätning med och utan skor vid jordade förhållanden ger en reduktion i den inducerade strömmen på omkring 40% (Holaday: 40%, Narda: 48%, GC-2: 48%, Eaton: 22%, H3702: 31%) då skor används. Motsvarande reduktion vid icke-jordade förhållanden är Holaday: 34%, Narda: 62%, GC-2: 41%. Eaton instrumentet ger generellt ett något högre värde vid mätning med, och ger således en ökning på 5% .

Motsvarande reduktion då en träpall placeras under mätinstrumentet är för Holadayinstrumentet 50%, Narda: 55%, GC-2: 49% och Eaton 34%, vid mätning utan

skor. Då skor används är motsvarande reduktion för Holadayinstrumentet 45%, Narda: 68%, GC-2: 42% och Eaton: 13%.

Som följd av observationen att planparallella strömmättningsinstrument med olika yta ger olika mätvärden vid icke-jordade förhållanden placerades en aluminiumskiva under Holaday respektive Narda instrumenten. Resultaten visar att skillnaden i mätvärde mellan de båda instrumenten reduceras betydligt (tabell 6). Mätskivan har tjockleken 10 mm och dimensionerna 35 x 41 cm, dvs. ungefär samma yta som det större Holadayinstrumentet.

Tabell 6. Inducerad ström vid mätning med respektive utan aluminiumskiva under de båda kommersiella mätinstrumenten vid icke-jordade förhållanden.

frekvens (MHz)	Narda		Holaday	
	utan Al-skiva	med Al-skiva	med Al-skiva	utan Al-skiva
15	5,9	13	15	14
27	9,5	19	21	22

Laborativ mätning (SSI)

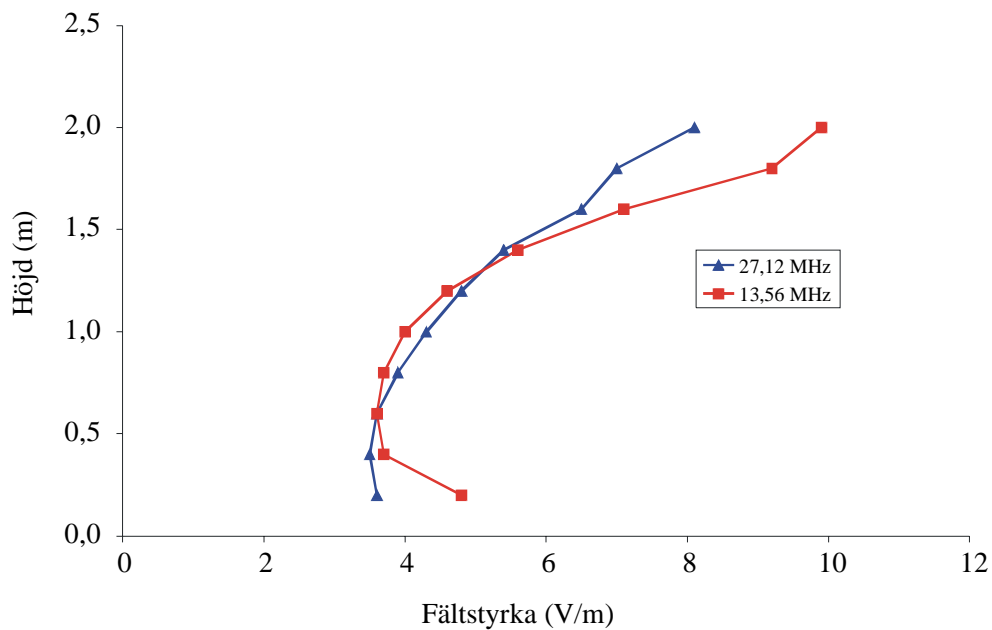
Den elektriska fältstyrkan vid mätningen på SSI för frekvenserna 13,56 respektive 27,12 MHz presenteras i figur 12. Statistik över dessa mätningar återfinns i tabell 7. Inducerade strömmar för försökspersonerna vid mätning i jordade förhållanden respektive med skor för de båda mätinstrumenten presenteras i tabell 8. Kvoten mellan de båda kommersiella mätinstrumenten vid mätning vid jordade förhållanden respektive då försökspersonen bar skor, presenteras i tabell 9. från den uppmätta strömmen (tabell 8) och medelvärdet av den elektriska fältstyrkan (tabell 7) och anges i tabell 9. Mätvärden då träskivor av olika tjocklek placerades mellan instrumentet och golvet för de olika mätinstrumenten presenteras i tabell 10. Återstående andelen ström har beräknats som $I_{5\text{cm}}/I_0$, respektive $I_{10\text{cm}}/I_0$, där I_0 anger strömmen vid jordade förhållanden, dvs. utan skiva mellan instrument och jord.

Tabell 7. Medelvärde och standardavvikelse (SD) av den elektrisk fältstyrka (V/m) vid mätning vid försöksupställningen på SSI för 13,56 respektive 27,12 MHz.

	27,12 MHz	13,56 MHz
medel	5,6	5,1
SD	2,3	1,6

Tabell 8. Inducerade strömmar (mA) vid mätning vid försöksuppställning på SSI, för varje person med respektive utan skor.

frekvens (MHz)		P1		P4		P5		P6		P7		P8	
		utan skor	med skor	utan skor	med skor	utan skor	med skor	utan skor	med skor	utan skor	med skor	utan skor	med skor
13,56	Holaday	-	6	16	8	12	8	18	9	16	5	10	5
27,12	Holaday	22	14	24	16	18	14	26	18	10	13	15	23
13,56	Narda	-	8	17	8	11	6	20	10	18	6	8	3
27,12	Narda	22	7	25	9	19	14	30	15	5	5	13	24



Figur 12. Elektrisk fältstyrka vid olika höjd över golvet vid 13,56 respektive 27,12 MHz, laborativa mätningen vid SSI.

Tabell 9. Kvoten mA/(V/m) vid mätning vid försöksuppställning på SSI, för varje person, jordad respektive med skor.

		P1		P4		P5		P6		P7		P8	
		utan skor	med skor	utan skor	med skor	utan skor	med skor	utan skor	med skor	utan skor	med skor	utan skor	med skor
13,56	Holaday	-	1,1	2,8	1,4	2,1	1,4	3,2	1,6	2,8	0,8	1,8	0,9
27,12	Holaday	4,3	2,8	4,7	3,2	3,6	2,8	5,1	3,6	2,0	2,6	3,0	4,5
13,56	Narda	-	1,3	3,1	1,3	2,0	1,1	3,5	1,7	3,2	1,0	1,4	0,4
27,12	Narda	4,2	1,4	4,9	1,8	3,8	2,7	6,0	3,0	1,0	1,0	2,5	4,8
13,56	GC-2	-	1,4	3,0	1,4	2,6	1,8	3,4	2,0	3,0	1,1	1,9	1,1
27,12	GC-2	4,3	2,7	4,7	2,7	3,7	2,5	5,1	3,4	1,8	2,0	2,7	4,4

Tabell 10. Reducerad ström i förhållande till ursprungligt värde (utan träskiva). Medelvärde för alla personer (4 st).

Instrument	Återstående andel (%)	
	Tjocklek = 5 cm	Tjocklek = 10 cm
Holaday	62 ± 3	58 ± 5
GC-2	48 ± 3	39 ± 3
Narda	33 ± 4	27 ± 4

Jämförelse med Gandhis teori

Vid jordade förhållanden, utan skor anges enligt Gandhi et al. (1985) och Gandhi et al. (1986) kvoten mellan inducerad ström (mA) och elektrisk fältstyrka (V/m), uppmätt som det fria fältet dvs. utan person närvarande, enligt formeln nedan.

$$\frac{I}{E} = 0,108 h^2 f_{MHz} \quad (f < 27 \text{ MHz})$$

$$\frac{I}{E} = 11,0 \left(\frac{f_{MHz}}{f_r} \right) \sin \left(\frac{f_{MHz}}{f_r} \right) \quad (f \geq 27 \text{ MHz})$$

I = inducerad ström (mA)

E = elektrisk fältstyrka (V/m)

h = personens längd (m)

f_{MHz} = frekvens (MHz)

f_r = resonansfrekvens (MHz)

Genom att låta $y = I/E$ för respektive mätinstrument och $x = h^2 * f$ (för $f > 27$ MHz) respektive $x = 11 * f / f_r * \sin(\pi/2 * f / f_r)$ (för $f \geq 27$ MHz) kan en regressionskvot beräknas enligt $y = kx$, där k anger den semiempiriska strömkvoten enligt Gandhis teori. k-värdena presenteras i tabell 11 och 12. Våra mätningar ger således en spännvidd på den semiempiriska strömkonstanten k (i formeln $I/E = k h^2 f_{MHz}$) på 0,05 till 0,08. Gandhi et al (1985) anger denna konstant till 0,108. Jokela och Puranen (1999) anger en spännvidd på 0,07 för magra personer till 0,11 för kraftiga personer. Blackwell et al. (1991) erhåller en strömkonstanten på 0,08 (i frekvensområdet 1-25 MHz) vid mätningar vid monopolantenner.

Tabell 11. Regressionsanalys enligt $y = kx$, där $y = I/E$ och $x = 0,108 * h^2 * f$, $f < 27$ MHz

Mätinstrument	SSI	HF-dipol	VHF-dipol (1m)	VHF-dipol (2m)	ALI
Holaday	0,04	0,06	-	-	0,08
Narda	0,04	0,06	-	-	0,08
GC-2	-	-	-	-	0,09
H3702	-	-	-	-	0,09
Eaton	-	-	-	-	0,08

Tabell 12. Regressionsanalys enligt $y = kx$, där $y = I/E$ och $x = 11 * f/f_r * \sin(\pi/2 * f/f_r)$, $f \geq 27$ MHz.

Mätinstrument	SSI	HF-dipol	VHF-dipol (1m)	VHF-dipol (2m)	ALI
Holiday	0,05	0,06	0,08	0,08	0,08
Narda	0,05	0,08	0,08	0,08	0,06
GC-2	-	-	-	-	0,09
H3702	-	-	-	-	0,09
Eaton	-	-	-	-	0,08

Jämförelse mellan Narda och Holiday instrumenten

Mätresultaten av inducerad ström för Narda respektive Holiday instrumenten vid jordade förhållanden jämförs i tabell 13 genom linjär regression där Narda instrumentet utgör den oberoende variabeln x och Holiday instrumentet den beroende variabeln y , enligt formeln $y = kx + m$. $p(k)$ respektive $p(m)$ anger signifikansnivån för uträknat k (enhetlös) respektive m (mA). Instrumenten visar lika om $k = 1$ och $m = 0$.

I figur 13-15 presenteras jämförelsen som "scatter diagram" där den inducerade strömmen för Narda och Holiday instrumenten för respektive mättillfälle och försöksperson ritats upp mot varandra.

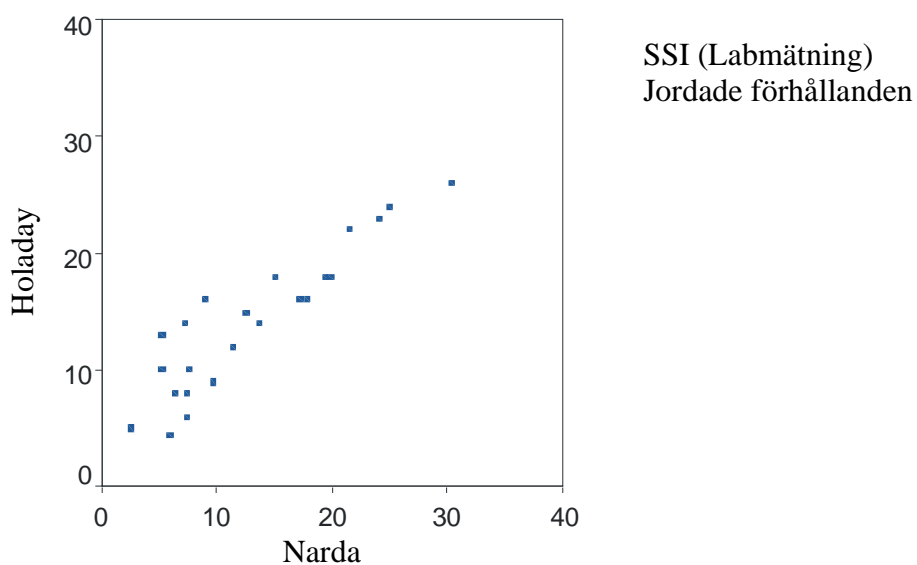
I tabell 14 presenteras jämförelse mellan Holiday, Narda och GC-2 instrumenten i icke-jordade förhållanden (träpall), där x anger den oberoende variabeln i regressionsanalysen och y anger den beroende variabeln.

Tabell 13. Jämförelse mellan Narda och Holiday instrumenten vid jordade förhållanden.

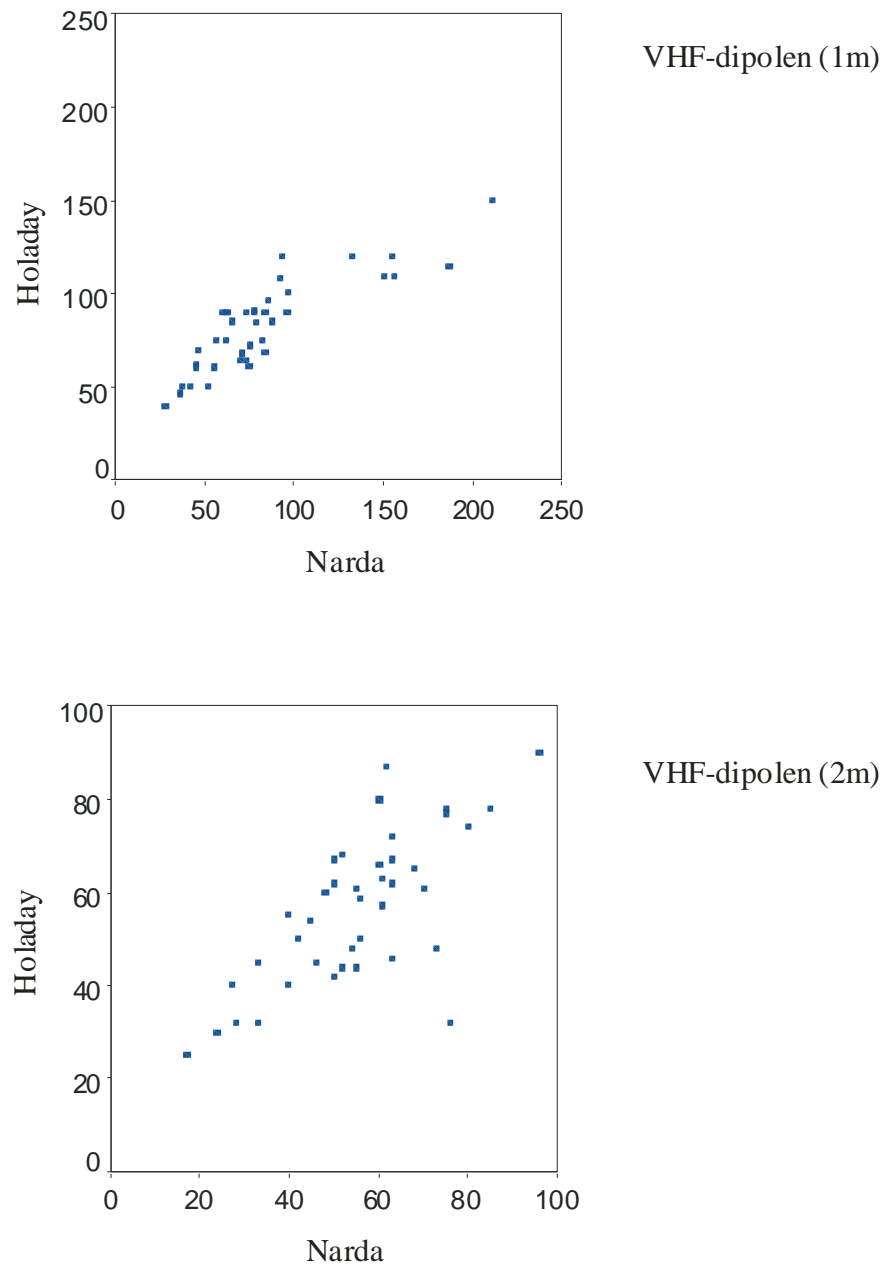
Med/utan skor	Plats	Koefficient (k)	$p(k)$	Konstant (m)	$p(m)$
Utan skor	HF-dipol	0,71	0,000	5,48	0,001
	VHF-dipol (1m)	0,41	0,000	53,4	0,000
	VHF-dipol (2m)	0,73	0,008	16,2	0,334
	ALI	0,82	0,000	6,38	0,000
	SSI	0,70	0,000	5,02	0,001
Med skor	HF-dipol	0,27	0,074	4,63	0,009
	VHF-dipol (1m)	0,89	0,000	17,2	0,082
	VHF-dipol (2m)	0,62	0,001	21,1	0,012
	ALI	0,96	0,000	4,68	0,000
	SSI	0,82	0,001	3,76	0,081

Tabell 14. Jämförelse mellan Narda, Holaday och GC-2 instrumenten vid icke jordade förhållanden, laborativ mätning (ALI).

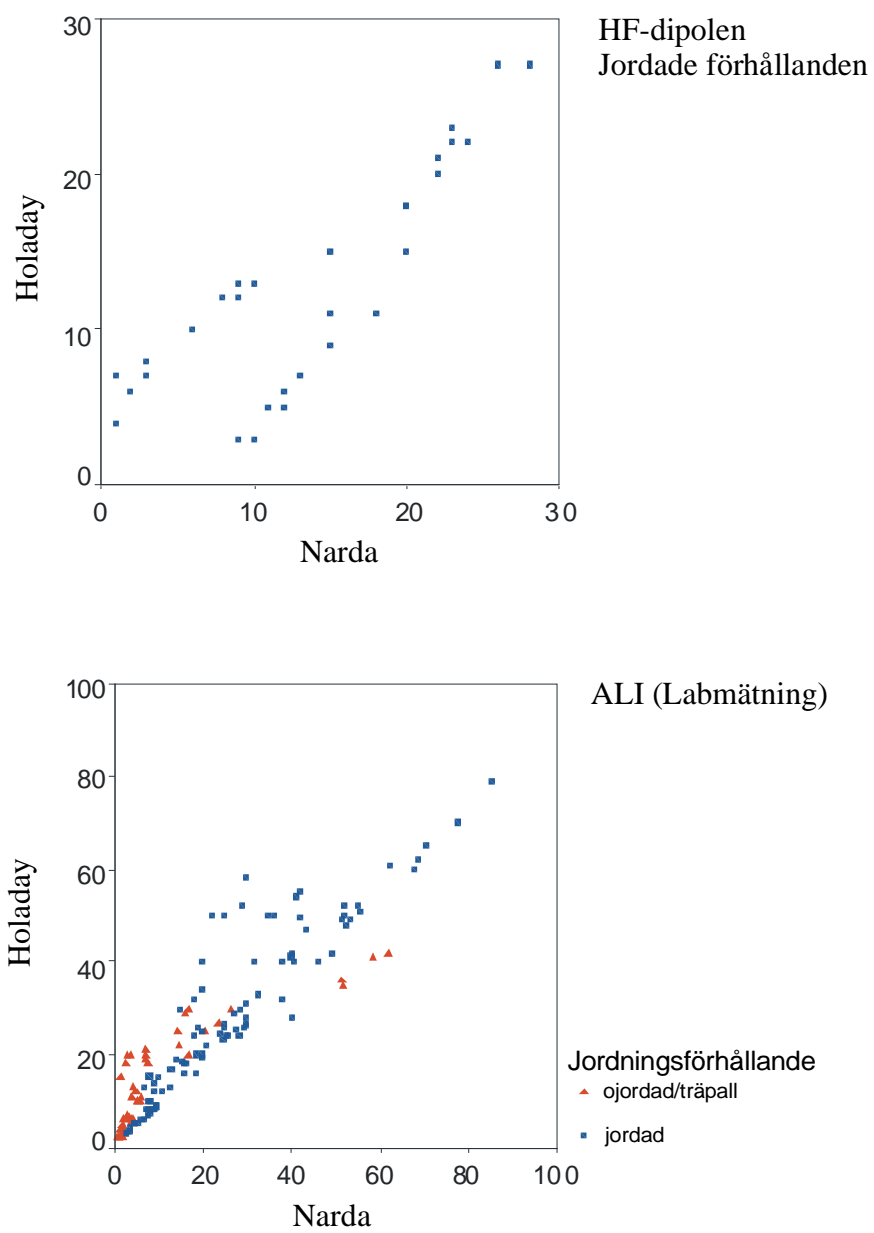
Oberoende (x)	Beroende (y)	Med/utan skor	Koefficient (k)	p(k)	Konstant (m)	p(m)
Narda	Holaday	Utan skor	0,59	0,000	8,40	0,000
		Med skor	0,93	0,000	6,17	0,000
Narda	GC-2	Utan skor	1,08	0,000	2,72	0,101
		Med skor	0,92	0,000	6,02	0,000
GC-2	Holaday	Utan skor	0,49	0,000	7,88	0,001
		Med skor	0,60	0,000	4,63	0,040



Figur 13. Inducerad ström för Narda respektive Holaday instrumenten. Mätning vid SSI (lab. mätning)



Figur 14. Inducerad ström för Narda respektive Holaday instrumenten. Mätning vid VHF-dipolen på 1 resp. 2 meters avstånd, vid jordade förhållanden.



Figur 15. Inducerad ström för Narda respektive Holaday instrumenten. Mätning vid HF-dipolen respektive vid ALI (lab. mätning).

Diskussion

Vi har vid fyra olika situationer studerat strömmen som induceras i kroppen vid exponering för radiofrekventa fält. Vid fältmätningarna (HF och VHF dipolen) och vid den provisoriska mätningen på SSI var fältförhållandena komplicerade och inhomogena men vid laboriemätningen vid ALI kan vi dock anta att vi hade ett relativt homogent elektriskt fält i vertikalled.

Generellt mäter vi genomgående något lägre värde på (I/E) kvoten jämfört med Gandhis teori (Tabell 10-11). Om man bortser från den provisoriska experimentella uppställningen vid SSI, är avvikelserna ungefär 30%. Våra mätningar visar dock att trots att den elektriska fältstyrkan är låg, mindre än 1/4 av Arbetarskyddsstyrelsens effektivvärden vid jordade förhållanden, kan strömmar i samma storleksordning som ICNIRPs riktlinjer (100 mA för yrkesexponering) uppnås. Detta visar på vikten av att även inducerade strömmar bör inkluderas i yrkeshygieniska mätprotokoll.

Våra mätningar visar i linje med tidigare studier (Blackwell et al. 1991; Gandhi and Furse 1997; Jokela and Puranen 1999; Jokela et al. 1994) att det finns individuella skillnader, där bl.a. individens längd är en avgörande faktor för hur mycket ström som induceras i kroppen. Det finns dock vissa indikationer på att även volymen (vikten) skulle kunna ha betydelse.

Det framgår klart i alla mätningar att man får en reduktion av den inducerade strömmen om personen befinner sig en viss höjd ovanför högfrekvensmässig jord, tex. genom att använda skor och/eller att stå på en träpall. Användning av skor ger en reduktion på omkring 40-50% för de planparallella instrumenten och omkring 30% för "clamp-on" instrumenten. Vid icke jordade förhållande är reduktionen ännu större vid mätning med skor för de planparallella instrumenten, men med Eaton instrumentet är skillnaden marginell.

Reduktionen av den inducerade strömmen då en träpall placeras under mätinstrumentet är svårare att ge ett absolut värde för, eftersom diskrepansen mellan de olika instrumenten är stor. För "clamp-on" mätaren (Eaton) är skillnaden mindre än för de planparallella instrumenten.

Ett tydligt resultat är också att de olika mätinstrumenten för inducerad ström ger olika mätresultat, framförallt vid icke-jordade förhållanden. Vid jordade förhållanden ger dock de olika instrumenten ungefär samma mätvärden. Då personen bär skor kommer generellt de planparallella instrumenten att ge ett något lägre värde än "clamp-on" instrumenten (boja). Detta kan delvis bero på att det hela tiden sker en kapacitiv koppling mellan personens ben och jord, denna ökar då personen bär skor, med bojan görs mätningen runt vristen, emedan de planparallella instrumenten mäter strömmen från fotsulan till jord, vilket kan innebära att mer ström kan genom kapacitiv koppling "försvinna" direkt från anklarna ner till jord, utan att ta vägen via fötterna.

Då en träpall placeras under mätinstrumentet så icke-jordade förhållanden uppnås, kommer skillnaden mellan resultaten från mätinstrumenten att öka. Detta kan delvis

förklaras med att man erhåller kapacitiv koppling mellan mätinstrumenten och jord, vilken är linjärt beroende av ytan hos instrumentet, vilket gör att kapacitansen är högre för det större Holaday instrumentet är för ex. Narda och GC-2, vars yta är ungefär hälften så stor som Holaday instrumentet. Detta leder till att ex. Narda instrumentet kommer att mäta ungefär halva strömmen jämfört med Holaday instrumentet (tabell 6). Vid mätning med en clamp-on meter, kommer endast luftrummet mellan fotsulor/skosulor att bidra till denna kapacitiva koppling. Ytan här utgörs av fotsulornas totala yta, vilket innebär en betydligt mindre kapacitiv koppling än då någon av de planparallella instrumenten används. Detta skulle kunna ge grund för att ett clamp-on instrument är lämpligare att använda än ett planparallellt instrument vid icke-jordade förhållanden. En viktig aspekt då man använder clamp-on instrument är att man måste genomföra mätningar på båda benen och den totala strömmen genom kroppen anges då som summan av de båda.

Ur tabell 10 kan man få en viss uppfattning om betydelsen av avståndet mellan personen och jord. Då en 5 cm tjock skiva placeras under instrumentet kommer strömmen att reduceras med 1/3 till 2/3 beroende på vilket mätinstrument som används. Då tjockleken på skivan fördubblas (10 cm) avtar strömmen ytterligare med endast ett par procent. Det är av intresse att genomföra med systematiska mätningar under kontrollerade förhållanden för att avgöra hur olika tjocklek på träskivan påverkar mätresultatet och diskrepansen mellan mätinstrumenten.

Avslutande kommentarer

Våra mätningar visar på vikten av att inducerade strömmar inkluderas i ett yrkeshygieniskt mätprotokoll, eftersom dessa kan vara höga trots att den elektriska fältstyrkan är låg. Personer med olika längd och vikt kommer inte att inducera lika stor ström i kroppen, vilket visar på nödvändigheten av individuella strömmätningar. Det är av största vikt att en god beskrivning finns om hur strömmätningarna skall genomföras och framförallt vilken typ av instrument som ska användas. Våra mätningar har visat på stor diskrepans mellan mätresultat för olika typer av kommersiella instrument, särskilt vid icke-jordade förhållanden, vilket är en vanlig situation inom industrin. Det förefaller troligt att ett clamp-on instrument är lämpligare att använda vid icke-jordade förhållanden, eftersom den kapacitiva kopplingen är mindre vid dessa mätningar än om ett planparallellt instrument används. Det behövs dock mer undersökningar på vilka eventuella problem dessa instrument kan ha med tanke på det faktum att instrumentet, som består av en järnkärna också i sig kommer att påverka de inducerade strömmarna i ankeln.

Summary

Around equipment transmitting radiofrequency fields, current will be induced in the body of the operator. In many standards and recommendations, reference levels for electric and magnetic field strength have been set up in order to limit the induced current in the body. It has been shown that even though the field parameters (electric and magnetic field) are well below the guidelines, the induced current can reach values where thermal heating can not be excluded. The International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP 1998) has in the latest issue, also included recommended reference levels of the induced current. The Swedish Occupational Safety and Health Administration has plans to adopt the ICNIRP guidelines as Swedish standard, which makes measurements of the induced current necessary .

In this project, we have investigated the magnitude of the induced current and the difficulties concerning the measurements. This has been performed by measurements near VHF and HF dipole antennas, but also in a symmetrical stripline (2.4*3*6 meters) constructed in our laboratory, in order to produce a whole-body exposure situation of homogenous field with a main component in the vertical axis. Two different types of commercial instruments have been used: parallel plate meters, measuring the induced current flowing in the body to ground through the feet and induced current probes, measuring the current flowing through the ankles. Both grounded and ungrounded condition have been studied. The latter was achieved by the use of a wooden plate with a height of 17 cm. All measurements were done with a person both standing barefoot and wearing shoes. The measurements has been done in the frequency range 3-50 MHz. In total, ten test persons participated in the study, each of them with different length and weight, which we also have taken into consideration in the evaluation.

The results partially demonstrate that the instruments give different readings during the same conditions. In grounded condition, the different instruments gave quite similar readings, but the difference between the instruments in ungrounded condition were sometimes even more than five times. The dissimilarity were most pronounced when comparing parallel plate meters with current probes. This is mainly due to the fact that the larger sized plane parallel plate meters give rise to higher capacitance than the current probes, were only the soles contribute to the total area.

Since many countries are about to adopt the ICNIRP guidelines as national standards, the problems of measurement need to be further investigated. There is a necessity of accurate description how the measurements shall be done, and which current meters should be used.

Keywords

measuring method, glue dryers, RF sealers, radiofrequency electromagnetic field.

Referenser

- Arbetskyddsstyrelsen. (1987). *Arbetskyddsstyrelsens författningssamling*, Högfrekventa elektromagnetiska fält. AFS 1987:2, Stockholm.
- Blackwell, R. P., Allen, S. G., and Unsworth, C. (1991). Electric field strengths and induced body currents close to monopole antennas. *Radiological Protection Bulletin* (120).
- Gandhi, O. P., Chatterjee, I., Wu, D., and Gu, Y. G. (1985). Likelihood of high rates of energy deposition in the human legs at the ANSI recommended 3-30-MHz RF safety levels. *Proceedings of the IEEE*, 73(6), 1145-7.
- Gandhi, O. P., Chen, J., and Riazi, A. (1986). Currents induced in a human being for plane-wave exposure conditions 0-50 MHz and for RF sealers. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, BME-33(8), 757-67.
- Gandhi, O. P., and Furse, C. M. (1997). Currents induced in the human body for exposure to ultrawideband electromagnetic pulses. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 39(2), 174-80.
- ICNIRP. (1998). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection [published erratum appears in *Health Phys* 1998 Oct;75(4):442]. *Health Phys*, 74(4), 494-522.
- Jokela, K., and Puranen, L. (1999). Occupational RF exposure. *Radiat Prot Dosim* 83(1-2):119-124; Exposure Metrics and Dosimetry For EMF Epidemiology, *Workshop Proceedings*, 7-9 September 1998, NRPB, Harwell, Oxon, UK.
- Jokela, K., Puranen, L., and Gandhi, O. P. (1994). Radio frequency currents induced in the human body for medium-frequency/high-frequency broadcast antennas. *Health Phys*, 66(3), 237-244.

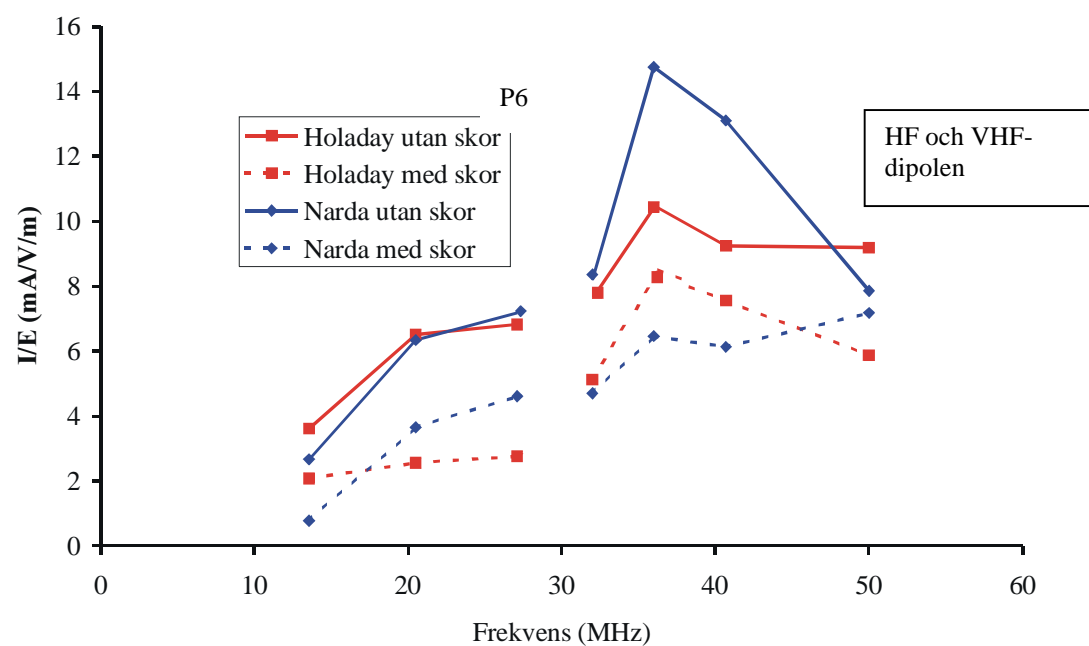
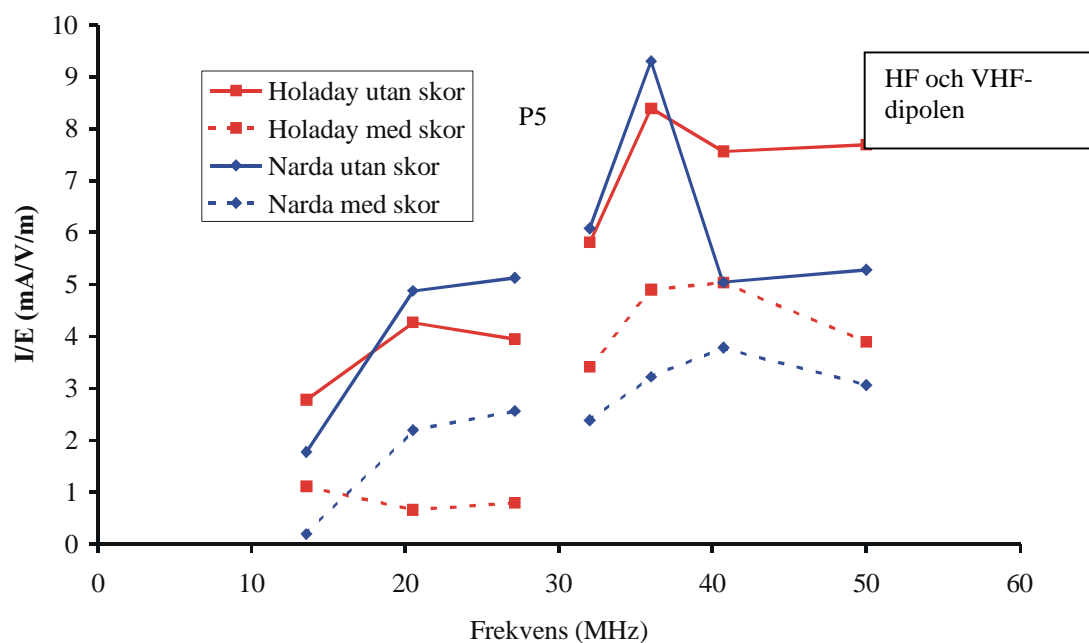
Appendix A (HF- och VHF dipolerna)

Tabell 15. Inducerad ström (mA) uppmätt med Holaday instrumentet vid HF respektive VHF-dipol antennen för respektive försöksperson, med respektive utan skor.

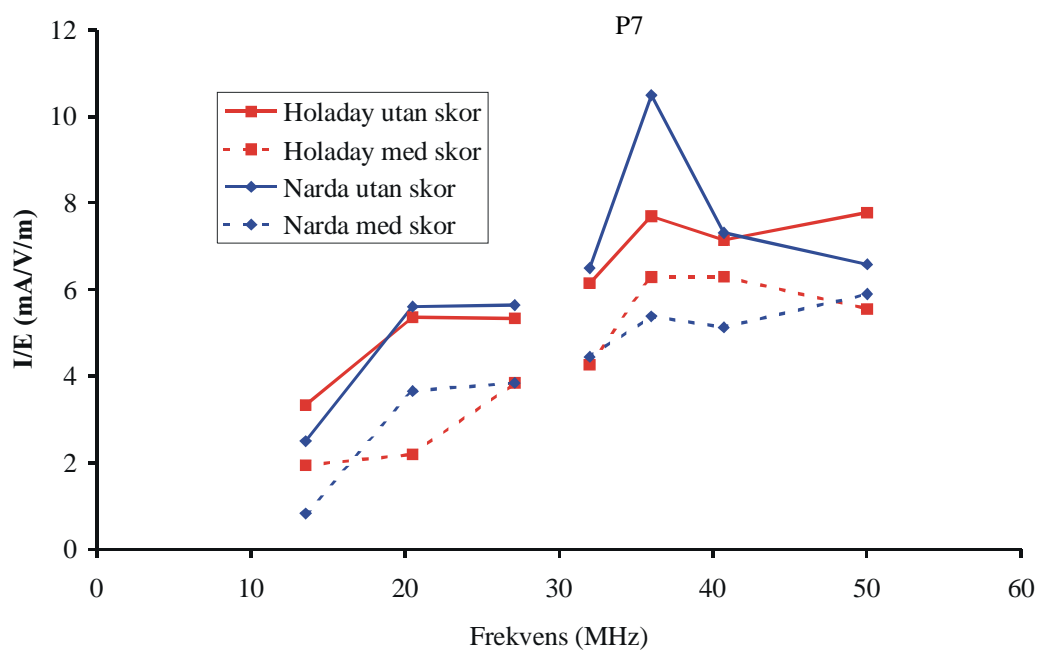
Holaday mätområde (30 mA)	frekvens (MHz)	P1		P4		P5		P6		P7	
		med skor	utan skor	med skor	utan skor	med skor	utan skor	med skor	utan skor	med skor	utan skor
HF dipolen	13,56	7	13	6	12	4	10	8	13	7	12
	20,5	5	20	6	23	3	18	11	27	9	22
	27,12	5	18	7	22	3	15	11	27	15	21
VHF dipolen (1m)	32	47	65	50	75	40	68	60	90	50	72
	36	90	120	85	115	70	120	120	150	90	110
	40,7	62	90	75	100	60	90	90	110	75	85
	50	50	84	61	96	46	90	69	108	65	91
VHF dipolen (2m)	32	30	45	32	50	25	42	40	57	32	44
	36	50	78	60	78	48	32	72	90	61	74
	41	45	63	55	65	40	87	68	77	54	62
	50	62	59	44	67	67	80	46	61	48	66

Tabell 16. Inducerad ström (mA) uppmätt med Narda instrumentet vid HF respektive VHF-dipol antennen för respektive försöksperson, med respektive utan skor.

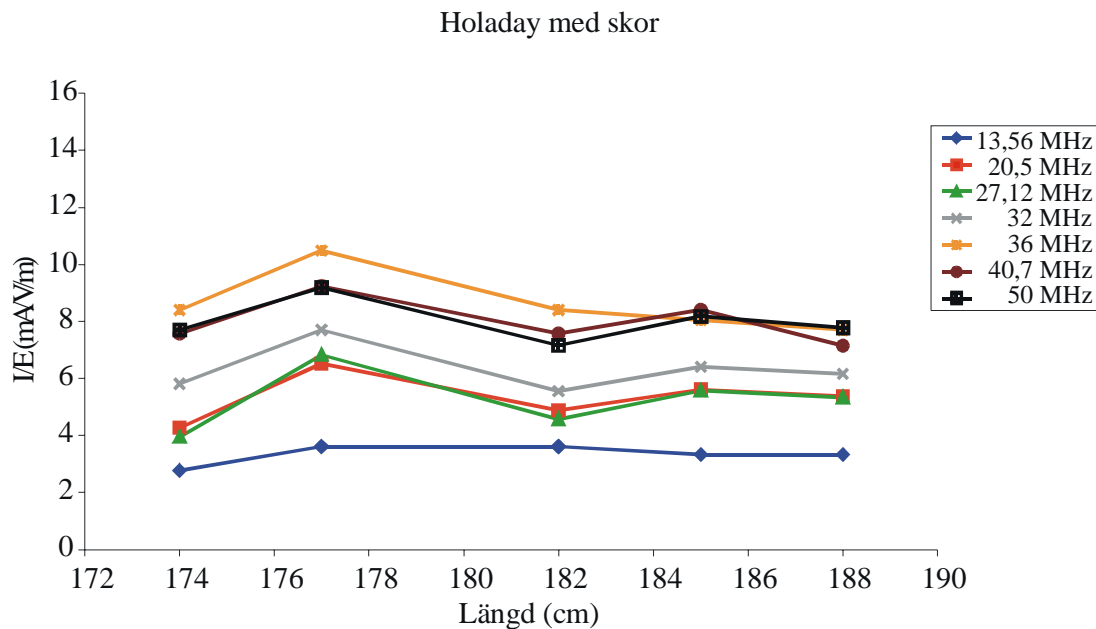
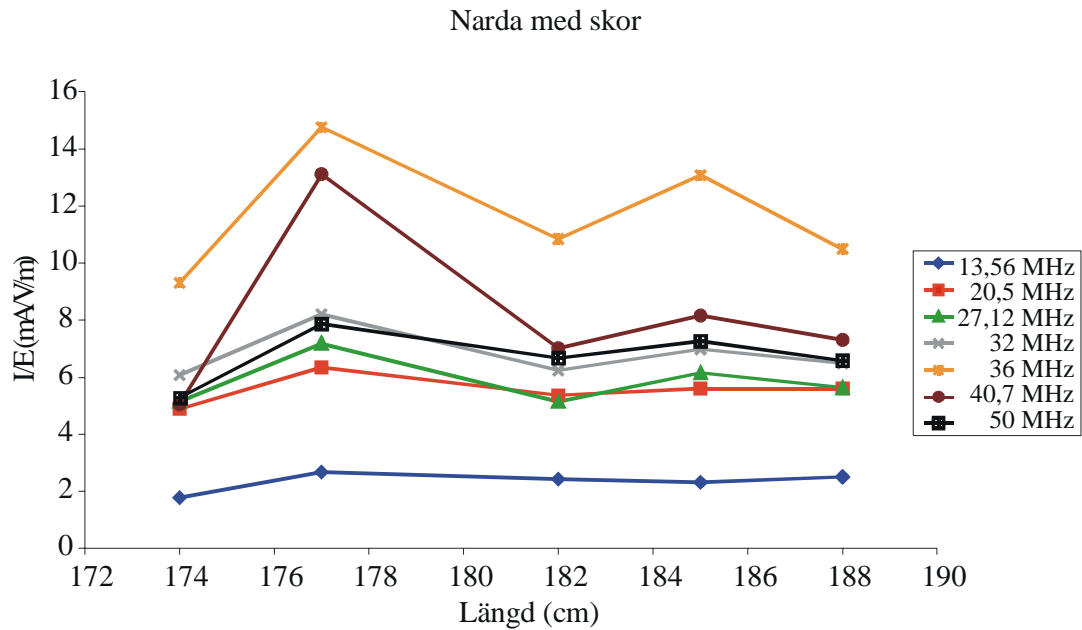
Narda (mätområde 100 mA)	frekvens (MHz)	P1		P4		P5		P6		P7		E-fält (V/m) medelfält
		med skor	utan skor	med skor	utan skor	med skor	utan skor	med skor	utan skor	med skor	utan skor	
HF dipolen	13,56	1	9	2	8	1	6	3	10	3	9	3,6
	20,5	12	22	12	23	9	20	15	26	15	23	4,1
	27,12	11	20	13	24	10	20	18	28	15	22	3,9
VHF dipolen (1m)	32	36	73	42	82	28	71	55	96	52	76	11,7
	36	61	155	65	187	46	133	93	211	77	150	14,3
	40,7	45	84	56	97	45	60	73	156	61	87	11,9
	50	37	78	75	85	36	62	84	92	69	77	11,7
VHF dipolen (2m)	32	24	46	28	56	17	50	40	61	33	52	7
	36	42	75	48	85	73	76	63	96	55	80	9,5
	41	33	61	40	68	27	62	52	75	45	63	7,8
	50	50	56	55	63	50	60	63	70	54	60	9



Figur 16. I/E (mA/V/m) som funktion av frekvensen för Holaday och Narda instrumentet, med respektive utan skor. Diagrammen visar mätresultatet för respektive person (P5 och P6). Brottet i diagrammen markerar de olika mättillfällena (HF-dipolen 13,56-27,12 MHz och VHF-dipolen 32-50 MHz).

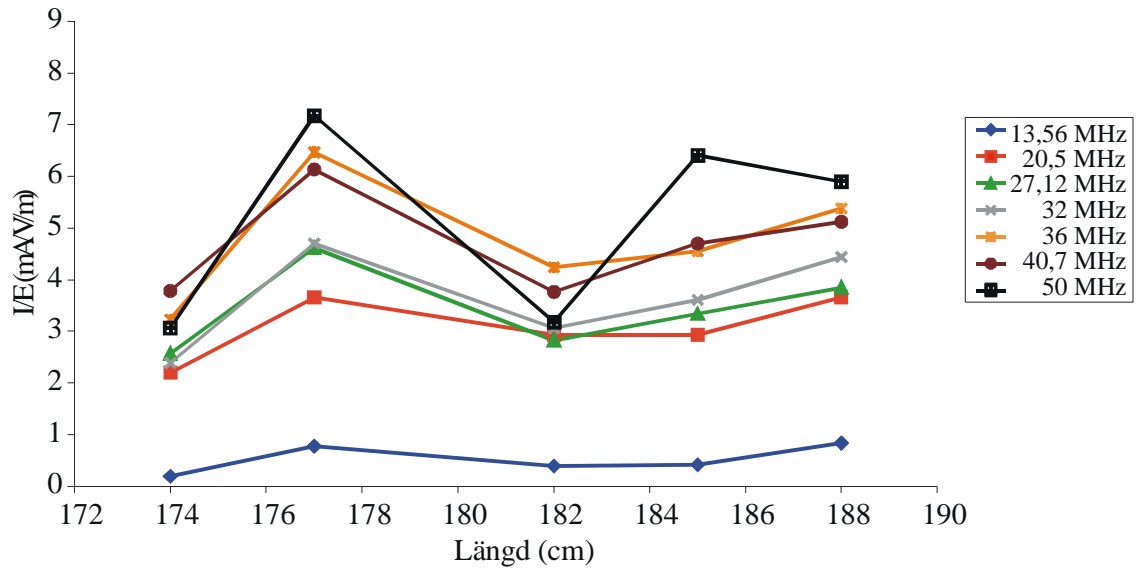


Figur 17. I/E (mA/V/m) som funktion av frekvensen för Holaday och Narda instrumentet, med respektive utan skor. Diagrammet visar mätresultatet för person P7. Brottet i diagrammen markerar de olika mättillfällena (HF-dipolen 13,56-27,12 MHz och VHF-dipolen 32-50 MHz).

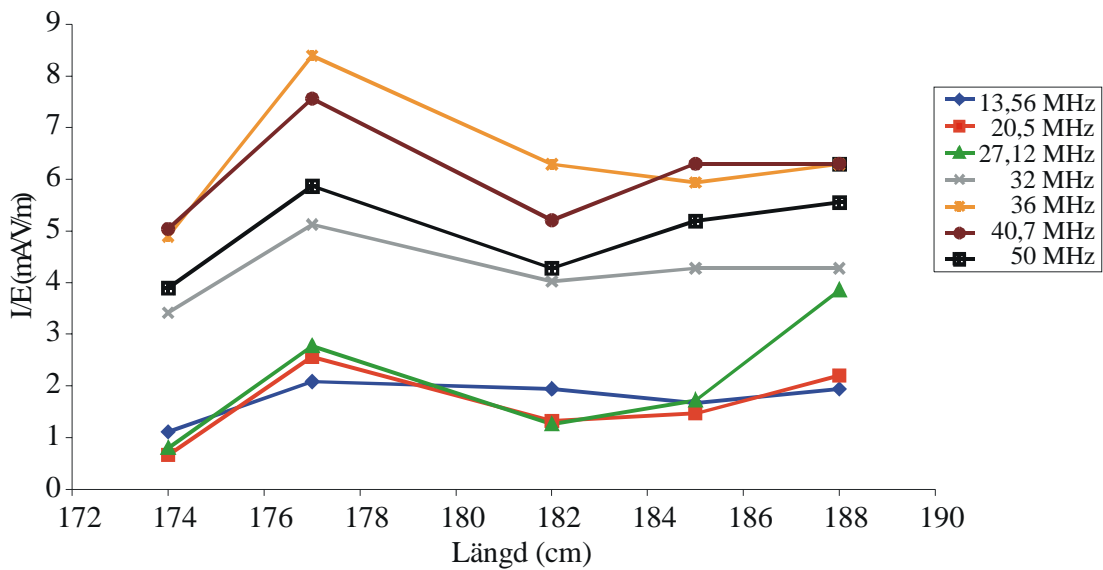


Figur 18. I/E (mA/V/m) som funktion av försökspersonens längd vid HF dipolen (13,56-27,12 MHz) respektive vid den VHF dipolen (32-50 MHz) för de båda kommersiella mätinstrumenten då försökspersonerna står barfota på mätinstrumentet (jordade förhållanden).

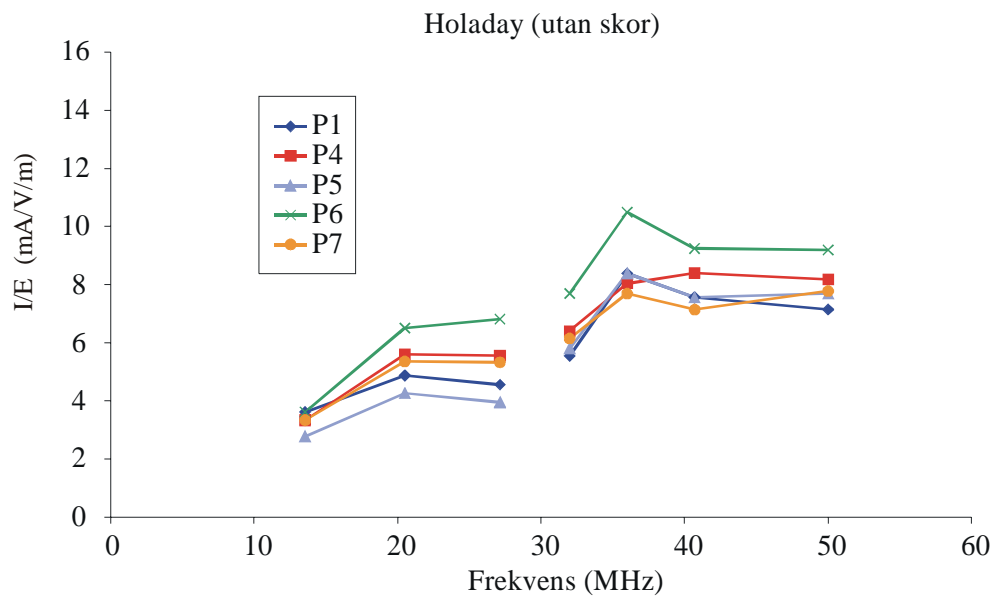
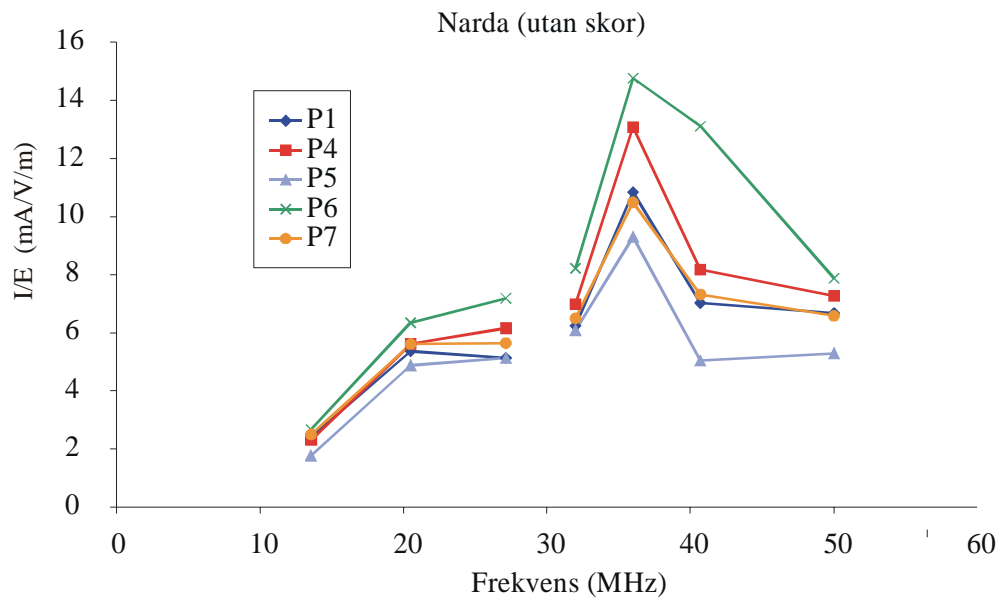
Narda med skor



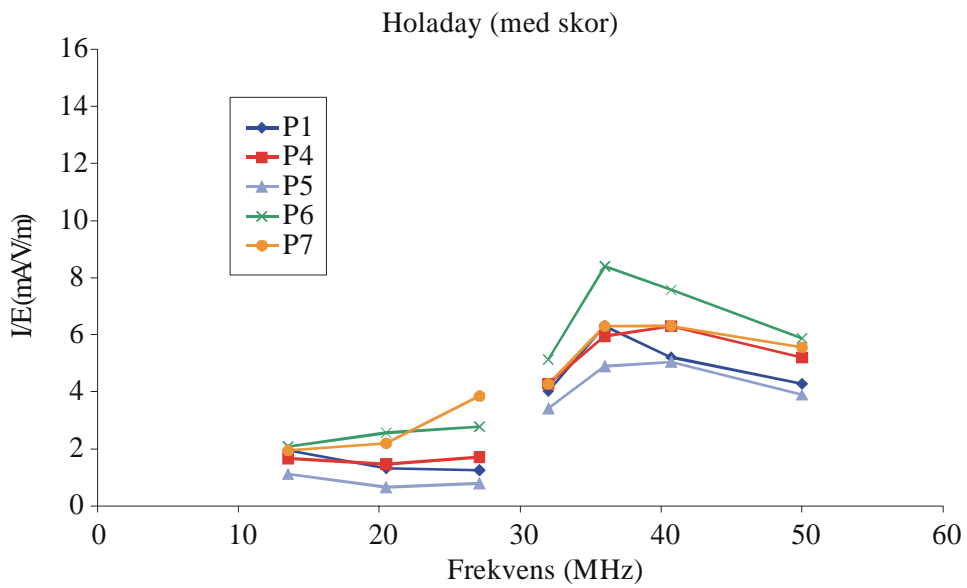
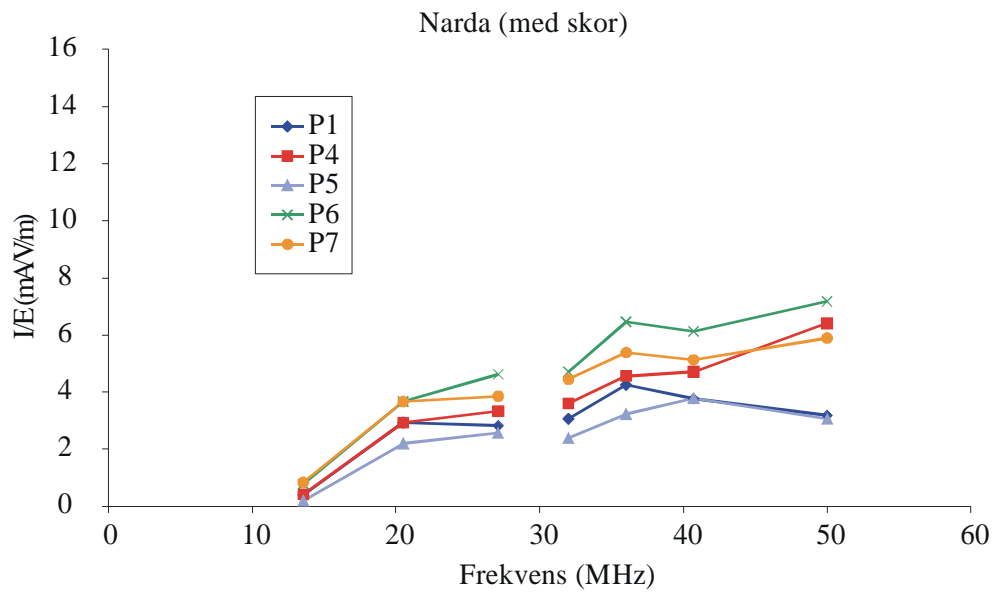
Holaday med skor



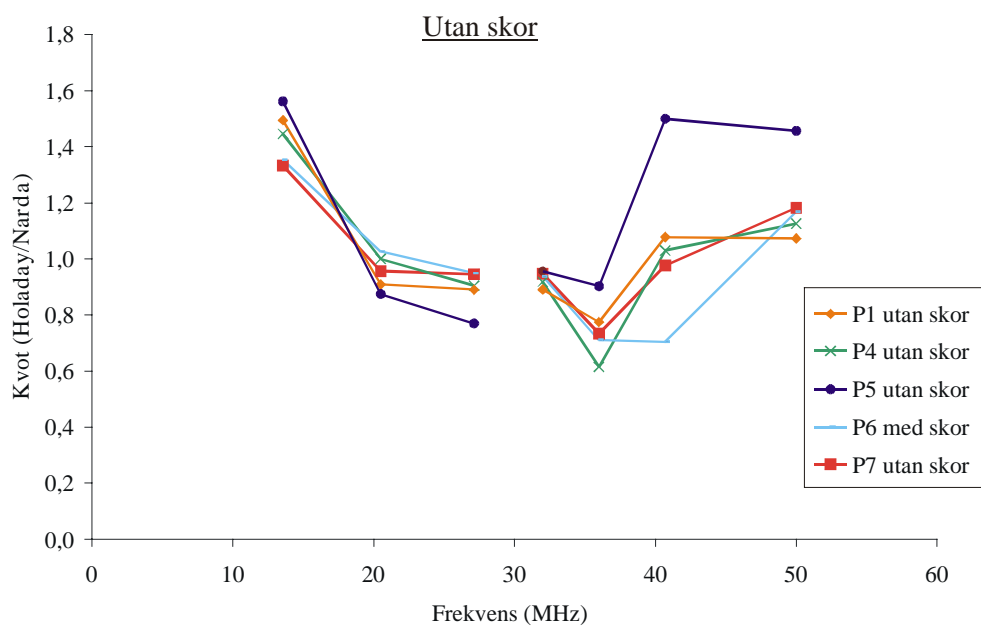
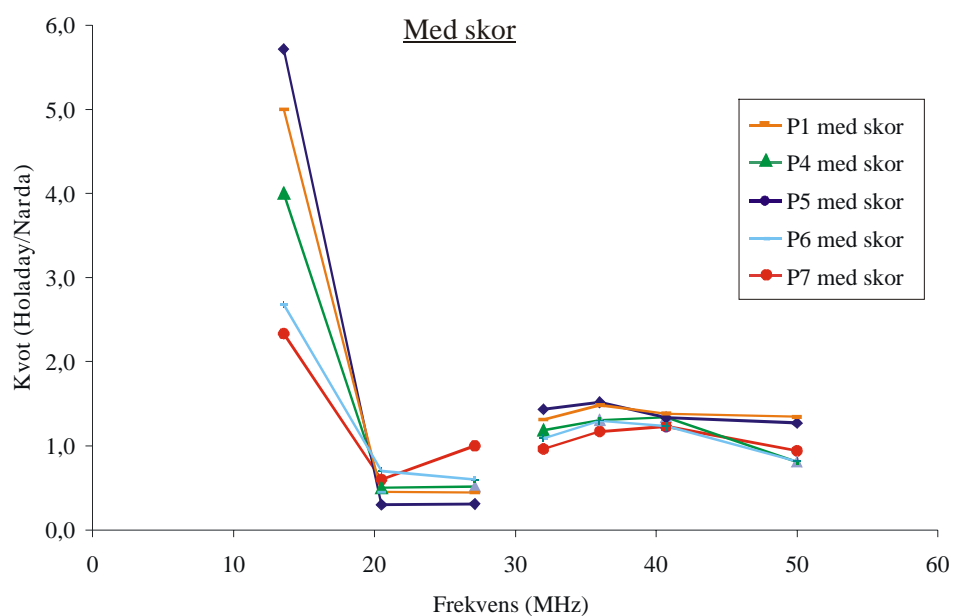
Figur 19. I/E (mA/V/m) som funktion av försökspersonens längd vid HF dipolen (13,56-27,12 MHz) respektive vid den VHF dipolen (32-50 MHz) för de båda kommersiella mätinstrumenten då försökspersonerna bär skor.



Figur 20. I/E (mA/V/m) som funktion av frekvensen för olika försökspersonen vid HF dipolen (13,56-27,12 MHz) respektive den mobila masten (32-50 MHz). Försökspersonerna står barfota på de två kommersiella mätinstrumenten.



Figur 21. I/E (mA/V/m) som funktion av frekvensen för olika försökspersonen vid HF dipolen (13,56-27,12 MHz) respektive den mobila masten (32-50 MHz). Försökspersonerna står med skor på de två kommersiella mätinstrumenten.)



Figur 22. Kvoten mellan den inducerade strömmen för de båda kommersiella mätinstrumenten vid mätning vid HF-dipolen (13,56-27,12 MHz) respektive VHF-dipolen (32-50 MHz). Mätning med respektive utan skor. Brotten i mätkurvan markerar de olika mätsituationerna (HF respektive VHF dipolen)

Appendix B (Lab. mätning ALI)

Tabell 17. Elektrisk fältstyrka i punkter enligt figur 4, $f = 6$ MHz.

total	höjd (m)	(0,0)	(0,1)	(0,2)	(1,0)	(1,1)	(1,2)	(2,2)	(2,1)	(2,0)
	0,4	10,8	11,1	10,6	10,8	11,0	10,8	10,5	10,8	10,6
	0,6	10,7	10,9	10,6	10,6	10,9	10,6	10,4	10,7	10,5
	0,8	10,4	10,8	10,4	10,3	10,7	10,3	10,2	10,5	10,2
	1,0	10,3	10,8	10,4	10,2	10,7	10,3	10,2	10,5	10,1
	1,2	10,5	11,0	10,6	13,3	10,8	10,4	10,4	10,7	10,2
	1,4	10,9	11,2	11,0	10,7	11,1	10,8	10,8	11,0	10,6
	1,6	11,4	11,6	11,5	11,2	11,5	11,4	11,2	11,2	10,9
	1,80	12,0	12,0	12,2	11,9	12,0	12,0	11,6	12,0	11,8
	1,9	-	-	12,7	12,3	12,4	12,5	-	12,3	12,1
z-led	höjd (m)	(0,0)	(0,1)	(0,2)	(1,0)	(1,1)	(1,2)	(2,2)	(2,1)	(2,0)
	0,4	10,7	10,9	10,5	10,7	10,9	10,7	10,4	10,7	10,5
	0,6	10,5	10,8	10,5	10,5	10,5	10,8	10,3	10,6	10,3
	0,8	10,3	10,7	10,4	10,2	10,3	10,7	10,2	10,5	10,0
	1,0	10,3	10,8	10,4	10,1	10,3	10,7	10,2	10,5	10,0
	1,2	10,5	10,9	10,6	10,3	10,4	10,8	10,4	10,7	10,2
	1,4	10,9	11,2	11,0	10,6	10,8	11,1	10,7	11,0	10,6
	1,6	11,3	11,6	11,4	11,1	11,3	11,5	11,1	11,2	10,9
	1,80	11,9	12,0	12,1	11,8	11,9	12,0	11,5	12,0	11,7
	1,9	-	-	12,6	12,1	12,3	12,4	-	12,3	12,0
y-led	höjd (m)	(0,0)	(0,1)	(0,2)	(1,0)	(1,1)	(1,2)	(2,2)	(2,1)	(2,0)
	0,4	1,7	1,0	1,0	1,7	1,0	1,0	1,0	1,0	1,7
	0,6	1,7	1,0	1,0	1,8	1,1	1,0	1,0	0,9	1,8
	0,8	1,4	1,0	0,7	1,5	0,8	0,9	0,6	0,9	1,5
	1,0	0,9	0,9	0	1,0	0	0,9	0	0,8	1,0
	1,2	0,3	0,8	0	0,4	0	0,8	0	0,7	0,5
	1,4	0,3	0,8	0,5	0,4	0,6	0,7	0,7	0,6	0,3
	1,6	0,9	0,8	1,0	0,9	1,2	0,7	1,2	0,6	0,9
	1,80	1,2	0,8	1,5	1,3	1,6	0,7	1,4	0,5	1,3
	1,9	-	-	1,6	1,5	1,8	0,7	-	0,5	1,5
x-led	höjd (m)	(0,0)	(0,1)	(0,2)	(1,0)	(1,1)	(1,2)	(2,2)	(2,1)	(2,0)
	0,4	0,1	0,1	0	0,3	0,4	0,4	0	0,4	0,5
	0,6	0,3	0,2	0	0,4	0,4	0,3	0	0,3	0,5
	0,8	0	0,1	0	0,4	0,3	0,3	0	0,4	0,5
	1,0	0,1	0,2	0	0,3	0	0,3	0	0,4	0,4
	1,2	0,3	0,3	0	0,4	0	0,3	0	0,4	0,4
	1,4	0,3	0,4	0	0,4	0	0,3	0	0,3	0,4
	1,6	0,4	0,4	0	0,4	0	0,4	0	0,4	0,6
	1,80	0,5	0,4	0	0,6	0	0,5	0	0,4	0,5
	1,9	-	-	0	0,6	0	0,4	-	0,4	0,6

Tabell 18. Elektrisk fältstyrka i punkter enligt figur 4, vid $f = 9$ MHz.

total	höjd (m)	(0,0)	(0,1)	(0,2)	(1,0)	(1,1)	(1,2)	(2,2)	(2,1)	(2,0)
	0,4	9,2	9,3	9,4	9,1	9,4	9,2	9,0	9,5	9,3
	0,6	9,0	9,2	9,0	8,9	9,2	8,9	8,7	9,0	8,9
	0,8	8,8	9,2	8,9	8,7	9,1	8,7	8,6	8,9	8,5
	1,0	8,8	9,2	8,9	8,6	9,1	8,7	8,6	8,9	8,4
	1,2	9,1	9,4	9,1	8,8	9,2	8,9	8,8	9,1	8,6
	1,4	9,5	9,6	9,4	9,2	9,4	9,2	9,1	9,3	8,9
	1,6	10	10	9,9	9,7	9,8	9,7	9,4	9,6	9,3
	1,80	10,5	10,6	10,5	10,4	10,3	10,3	9,7	9,8	10
	1,9	10,8	10,9	10,9	10,6	10,6	10,6	-	-	-
z-led	höjd (m)	(0,0)	(0,1)	(0,2)	(1,0)	(1,1)	(1,2)	(2,2)	(2,1)	(2,0)
	0,4	9,2	9,3	9,3	9,0	9,3	9,1	8,9	9,1	9,2
	0,6	8,9	9,2	9,0	8,9	9,2	8,9	8,7	9,0	8,8
	0,8	8,8	9,1	8,8	8,6	9,0	8,7	8,6	8,9	8,5
	1,0	8,8	9,2	8,8	8,6	9,0	8,7	8,6	8,9	8,4
	1,2	9,0	9,4	9,0	8,8	9,2	8,8	8,7	9,1	8,6
	1,4	9,3	9,6	9,3	9,1	9,4	9,1	9,0	9,3	8,9
	1,6	9,8	10	9,7	9,5	9,8	9,5	9,3	9,5	9,2
	1,80	10,3	10,6	10,3	10,2	10,3	10,0	9,5	9,8	9,8
	1,9	10,7	10,9	10,7	10,4	10,6	10,4	-	-	-
y-led	höjd (m)	(0,0)	(0,1)	(0,2)	(1,0)	(1,1)	(1,2)	(2,2)	(2,1)	(2,0)
	0,4	0,6	0	0	1,0	0,7	0,2	0	0,5	1,3
	0,6	0,7	0	0	1,1	0,5	0	0	0,3	1,2
	0,8	0,4	0	0	0,6	0,5	0	0	0,4	0,8
	1,0	0,2	0	0,6	0,3	0,5	0,6	0,4	0,4	0,4
	1,2	0,8	0	1,0	0,6	0,4	1,0	0,9	0,4	0,5
	1,4	1,3	0	1,4	1,2	0,4	1,4	1,3	0,4	1,0
	1,6	1,8	0	1,8	1,7	0,4	1,8	1,7	0,3	1,5
	1,80	2	0	2,2	2,1	0,4	2,2	1,7	0,2	1,9
	1,9	2,1	0	2,3	2,1	0,3	2,3	-	-	-
x-led	höjd (m)	(0,0)	(0,1)	(0,2)	(1,0)	(1,1)	(1,2)	(2,2)	(2,1)	(2,0)
	0,4	0,6	0,7	0,7	0,4	0,7	0,8	0,6	0,5	0,5
	0,6	0,5	0,6	0,7	0,4	0,7	0,7	0,6	0,5	0,5
	0,8	0,6	0,7	0,7	0,5	0,7	0,7	0,5	0,4	0,5
	1,0	0,7	0,7	0,6	0,6	0,7	0,6	0,4	0,4	0,5
	1,2	0,7	0,6	0,6	0,6	0,7	0,5	0,4	0,5	0,5
	1,4	0,7	0,6	0,5	0,7	0,7	0,5	0,4	0,6	0,5
	1,6	0,8	0,6	0,3	0,8	0,7	0,4	0,3	0,6	0,5
	1,80	0,7	0,7	0,2	0,8	0,7	0	0,2	0,8	0,6
	1,9	0,7	0,6	0	0,8	0,7	0,2	-	-	-

Tabell 19. Elektrisk fältstyrka i punkter enligt figur 4, vid $f = 16$ MHz.

total	höjd (m)	(0,0)	(0,1)	(0,2)	(1,0)	(1,1)	(1,2)	(2,2)	(2,1)	(2,0)
	0,4	8,3	7,9	7,4	8,6	8,8	7,9	8,4	9,0	8,9
	0,6	8,2	7,9	7,3	8,6	8,7	7,8	8,2	9,0	8,9
	0,8	8,0	7,8	7,4	8,4	8,7	7,9	8,5	9,1	8,8
	1,0	7,9	7,8	7,5	8,3	8,7	8,1	8,9	9,2	8,8
	1,2	7,9	7,9	7,7	8,3	8,9	8,4	9,3	9,5	9,0
	1,4	8,0	8,0	7,9	8,5	9,0	8,8	9,8	9,8	9,2
	1,6	8,2	8,2	8,3	8,8	9,4	9,2	10,2	10,0	9,4
	1,80	8,4	8,4	8,7	9,2	9,8	9,8	10,6	10,7	10,0
	1,9	-	-	9,0	9,4	10,0	10,1	10,7	10,9	10,2
z-led	höjd (m)	(0,0)	(0,1)	(0,2)	(1,0)	(1,1)	(1,2)	(2,2)	(2,1)	(2,0)
	0,4	8,1	7,7	7,2	8,4	8,7	7,8	8,2	9,0	8,8
	0,6	8,0	7,7	7,2	8,4	8,6	7,7	8,1	8,9	8,8
	0,8	7,8	7,6	7,2	8,1	8,5	7,7	8,3	8,9	8,6
	1,0	7,6	7,6	7,3	8,0	8,5	7,8	8,6	9,0	8,7
	1,2	7,6	7,6	7,4	8,1	8,6	8,0	8,9	9,2	8,8
	1,4	7,7	7,7	7,6	8,3	8,8	8,4	9,4	9,5	9,1
	1,6	7,9	7,9	7,9	8,5	9,1	8,8	9,8	9,7	9,3
	1,80	8,1	8,1	8,3	8,9	9,5	9,3	10,1	10,4	9,9
	1,9	-	-	8,6	9,1	9,7	9,6	10,3	10,7	10,1
y-led	höjd (m)	(0,0)	(0,1)	(0,2)	(1,0)	(1,1)	(1,2)	(2,2)	(2,1)	(2,0)
	0,4	1,8	1,2	0,8	1,8	1,2	0,9	1,1	1,1	1,7
	0,6	1,8	1,3	0,9	1,8	1,3	1,0	1,2	1,3	1,7
	0,8	1,8	1,5	1,1	1,7	1,4	1,4	1,6	1,5	1,6
	1,0	1,7	1,6	1,4	1,6	1,5	1,7	2,0	1,7	1,4
	1,2	1,7	1,7	1,7	1,4	1,6	2,0	2,4	1,7	1,2
	1,4	1,8	1,8	2,0	1,4	1,7	2,3	2,6	1,8	1,1
	1,6	1,9	1,9	2,2	1,4	1,7	2,5	2,9	1,8	1,1
	1,80	1,9	1,9	2,3	1,5	1,7	2,7	2,9	1,6	1,1
	1,9	-	-	2,4	1,5	1,7	2,8	2,9	1,7	1,2
x-led	höjd (m)	(0,0)	(0,1)	(0,2)	(1,0)	(1,1)	(1,2)	(2,2)	(2,1)	(2,0)
	0,4	0,7	0,7	0,7	0,9	1,0	0,4	0,3	1,0	1,0
	0,6	0,7	0,8	0,6	0,9	1,1	0,5	0,5	1,0	0,9
	0,8	0,8	0,9	0,9	1,1	1,2	0,8	0,8	1,2	1,1
	1,0	0,9	1,0	1,1	1,2	1,4	0,9	0,9	1,3	1,2
	1,2	1,1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,1	1,1	1,4	1,2
	1,4	1,1	1,2	1,2	1,3	1,5	1,2	1,1	1,3	1,2
	1,6	1,2	1,2	1,3	1,4	1,5	1,2	1,1	1,3	1,1
	1,80	1,2	1,2	1,2	1,4	1,5	1,1	1,2	1,8	1,2
	1,9	-	-	1,2	1,4	1,4	1,1	1,1	1,3	1,1

Tabell 20. Elektrisk fältstyrka i punkter enligt figur 4, vid $f = 27$ MHz.

total	höjd (m)	(0,0)	(0,1)	(0,2)	(1,0)	(1,1)	(1,2)	(2,2)	(2,1)	(2,0)
	0,4	8,7	8,9	8,8	11,4	11,6	11,5	13,9	13,75	13,4
	0,6	8,6	8,9	8,7	11,4	11,6	11,5	13,3	14,1	13,5
	0,8	9,3	9,4	9,5	12,0	12,0	11,3	13,2	14,4	14,0
	1,0	10,0	9,9	10,0	12,5	12,5	11,5	13,2	14,7	14,4
	1,2	10,6	10,3	10,5	13,1	13,0	11,8	13,3	15,3	14,9
	1,4	11,1	10,8	11,7	13,7	13,4	12,1	13,5	15,7	15,5
	1,6	11,5	11,2	11,3	14,2	13,8	12,5	13,6	16,0	15,9
	1,80	11,9	11,4	11,9	14,7	14,1	12,9	14,0	16,6	16,5
	1,9	-	-	12,3	15,0	14,3	13,1	-	16,9	16,9
z-led	höjd (m)	(0,0)	(0,1)	(0,2)	(1,0)	(1,1)	(1,2)	(2,2)	(2,1)	(2,0)
	0,4	7,4	8,2	8,4	10,8	11,3	11,0	13,4	13,3	13,0
	0,6	7,9	8,5	7,7	10,9	11,4	10,7	12,5	13,9	13,1
	0,8	8,6	8,7	7,6	11,4	11,6	10,2	12,1	14,0	13,5
	1,0	9,1	9,0	8,3	11,9	11,9	10,1	11,8	14,2	13,8
	1,2	9,6	9,4	8,8	12,4	12,2	10,2	11,8	14,7	14,3
	1,4	10,0	9,9	9,2	12,9	12,7	10,3	11,7	15,1	14,8
	1,6	10,5	10,3	8,9	13,5	13,1	10,5	11,8	15,3	15,1
	1,80	10,9	10,7	9,3	14,0	13,5	10,9	12,0	16,1	15,9
	1,9	-	-	9,9	14,4	13,8	11,2	-	16,4	16,2
y-led	höjd (m)	(0,0)	(0,1)	(0,2)	(1,0)	(1,1)	(1,2)	(2,2)	(2,1)	(2,0)
	0,4	3,1	2,3	2,2	2,8	2,4	2,9	3,4	2,9	2,9
	0,6	3,3	1,8	3,4	3,2	2,7	4,0	4,3	2,7	3,1
	0,8	3,7	2,5	4,7	3,6	3,3	4,5	5,0	3,3	3,6
	1,0	4,2	3,1	5,4	4,1	3,7	5,0	5,5	3,7	4,0
	1,2	4,4	3,5	5,9	4,4	4,1	5,5	5,8	4,2	4,4
	1,4	4,6	3,8	6,2	4,6	4,3	5,8	6,1	4,3	4,6
	1,6	4,6	4,1	6,2	4,6	4,3	6,1	6,3	4,4	4,7
	1,80	4,5	4,2	6,4	4,5	4,1	6,4	6,5	4,1	4,6
	1,9	-	4,1	6,4	4,4	4,0	6,4	-	3,9	4,5
x-led	höjd (m)	(0,0)	(0,1)	(0,2)	(1,0)	(1,1)	(1,2)	(2,2)	(2,1)	(2,0)
	0,4	0,3	0,8	1,0	0,3	1,2	1,3	1,6	1,6	0
	0,6	0,3	0	2,0	0,3	0,2	1,5	1,4	0	0
	0,8	0,4	0,5	2,8	0,3	0,4	1,9	1,7	0	0
	1,0	0,4	0,6	3,0	0,4	0,6	2,2	1,9	0	0
	1,2	0,4	0	3,2	0,6	0,6	2,4	2,1	0,4	0
	1,4	0,4	0,8	3,3	0,6	0,7	2,5	2,3	0,6	0,4
	1,6	0,4	0,9	3,4	0,7	0,7	2,6	2,4	0,7	0,7
	1,80	0,4	0,9	3,4	0,7	0,7	2,7	2,4	0,5	0,4
	1,9	-	0,9	3,5	0,6	0,6	2,7	-	0,5	0,6

Tabell 21. Inducerad ström för försökspersonerna vid olika frekvenser, vid jordade förhållanden, med respektive utan Mätinstrument: Holaday. Den elektriska fältstyrkan var 10,0 V/m i referenspunkten vid varje mätning.

f (MHz)	P1		P2		P3		P4		P6	
	utan skor	med skor	utan skor	med skor	utan skor	med skor	utan skor	med skor	utan skor	med skor
3	9,0	5,0	8,0	5,0	7	3	8,2	5,2	8,8	4,2
9	26	14	25	15	24	10	26	17	27	13
16	49	25	50	26	40	19	48	30	52	24
27	60,	40	51	40	50	30	70	52	79	42

f (MHz)	P7		P9		P10		P11	
	utan skor	med skor	utan skor	med skor	utan skor	med skor	utan skor	med skor
3	8,8	6,0	8	3,5	7,5	3,5	8,0	5,0
9	26	19	24	12	23	12	24	15
16	49	33	40	20	28	18	32	27
27	65	50	52	34	50	32	62	47

Tabell 22. Inducerad ström för försökspersonerna vid olika frekvenser, vid jordade förhållanden, med respektive utan Mätinstrument: Narda. Den elektriska fältstyrkan var 10,0 V/m i referenspunkten vid varje mätning.

f (MHz)	P1		P2		P3		P4		P6	
	utan skor	med skor	utan skor	med skor	utan skor	med skor	utan skor	med skor	utan skor	med skor
3	9,4	4,2	8,6	4,6	7,6	2,6	8,9	5,2	9,4	3,5
9	30	8,9	24	8,0	25	7,8	27	13	30	6,9
16	51	20	42	18,8	41	14	52	29	55	1
27	68	38	56	32	25	15	78	52	85	40

f (MHz)	P7		P9		P10		P11	
	utan skor	med skor	utan skor	med skor	utan skor	med skor	utan skor	med skor
3	9,3	5,9	8,9	3,6	8,1	3,4	8,6	4,7
9	29	15	28	11	25	8,9	26	10
16	53	33	46	18	40	16	38	25
27	71	52	29	20	22	18	69	43

Tabell 23. Inducerad ström för försökspersonerna vid olika frekvenser, vid jordade förhållanden, med respektive utan Mätinstrument: GC-2. Den elektriska fältstyrkan var 10,0 V/m i referenspunkten vid varje mätning.

f (MHz)	P1		P2		P3		P4		P6	
	utan skor	med skor	utan skor	med skor	utan skor	med skor	utan skor	med skor	utan skor	med skor
3	9,8	18	9,9	7,3	7,7	1,5	9,2	4,4	9,7	2,2
9	27	13	23	13	23	8,9	26	15	27	12
16	50	24	41	23	39	15	53	31	59	22
27	67	38	53	32	47	22,6	78	50	88	38

f (MHz)	P7		P9		P10		P11	
	utan skor	med skor	utan skor	med skor	utan skor	med skor	utan skor	med skor
3	9,8	5,1	9,1	2,2	7,9	2,0	8,8	3,8
9	27	17	25	11	22	9,4	24	14
16	53	34	43	19	37	16	48	27
27	69	49	53	28	46	24	67	43

Tabell 24. Inducerad ström för försökspersonerna vid olika frekvenser, vid jordade förhållanden, med respektive utan Mätinstrument: Eaton. Den elektriska fältstyrkan var 10,0 V/m i referenspunkten vid varje mätning.

f (MHz)	P1		P2		P3		P4		P6	
	utan skor	med skor	utan skor	med skor	utan skor	med skor	utan skor	med skor	utan skor	med skor
3	12	6,3	9,2	5,4	9,5	3,7	12	7,5	13	5,7
9	28	17	13	12	25	13	27	20	29	17
16	40	32	13	13	26	21	43	36	39	39
27	61	54	54	45	47	39	72	66	83	68

f (MHz)	P7		P9		P10		P11	
	utan skor	med skor	utan skor	med skor	utan skor	med skor	utan skor	med skor
3	11	7,7	9,7	4,4	8,6	4,2	11	7,0
9	29	21	21	21	24	15	26	18
16	44	38	30	26	28	24	36	32
27	67	60	50	46	48	42	65	53

Tabell 25. Inducerad ström för försökspersonerna vid olika frekvenser, vid jordade förhållanden, med respektive utan Mätinstrument: H3702. Den elektriska fältstyrkan var 10,0 V/m i referenspunkten vid varje mätning.

f (MHz)	P1		P2		P3		P4		P6	
	utan skor	med skor	utan skor	med skor	utan skor	med skor	utan skor	med skor	utan skor	med skor
3	10	6,5	-	-	-	-	9,5	6,9	9,4	5,4
9	28	17	-	-	-	-	29	19	30	16
16	52	32	-	-	-	-	53	37	58	31
27	57	43	-	-	-	-	73	57	82	53

f (MHz)	P7		P9		P10		P11	
	utan skor	med skor	utan skor	med skor	utan skor	med skor	utan skor	med skor
3	9,7	7,2	-	-	-	-	9,2	6,6
9	29	21	-	-	-	-	26	19
16	52	38	-	-	-	-	47	33
27	66	54	-	-	-	-	59	46

Tabell 26. Inducerad ström för försökspersonerna vid olika frekvenser, vid ojordade förhållanden, dvs. då en träpall placerats under mätinstrumentet. Mätning med respektive utan skor. Mätinstrument: Holaday. Den elektriska fältstyrkan var 10,0 V/m i referenspunkten vid varje mätning.

f (MHz)	P1		P3		P9		P10	
	utan skor	med skor	utan skor	med skor	utan skor	med skor	utan skor	med skor
3	3,0	2,5	2,5	2,0	3,0	2,0	3,0	2,0
6	6,0	4,8	5,0	3,8	6	4,2	5,5	4,0
9	11	7,2	10	6,0	10	6,5	10	6,0
16	21	13	20	11	18	12	19	12,2
20	42	30	35	20	41	27	36	25
27	30	20	25	15	29	20	22	18

Tabell 27. Inducerad ström för försökspersonerna vid olika frekvenser, vid ojordade förhållanden, dvs. då en träpall placerats under mätinstrumentet. Mätning med respektive utan skor.

Mätinstrument: Narda. Den elektriska fältstyrkan var 10,0 V/m i referenspunkten vid varje mätning.

f (MHz)	P1		P3		P9		P10	
	utan skor	med skor	utan skor	med skor	utan skor	med skor	utan skor	med skor
3	2,0	1,0	1,8	0,8	2,0	0,9	1,8	0,9
6	4,2	1,8	3,8	1,4	4,1	2,0	3,8	1,7
9	6,0	2,8	5,3	2,0	5,8	3,1	5,4	2,7
16	7,2	4,4	7,1	3,9	7,3	5,0	7,2	4,5
20	62	26	52	17	58	24	51	20
27	17	3,5	14	1,3	16	2,7	15	2,6

Tabell 28. Inducerad ström för försökspersonerna vid olika frekvenser, vid ojordade förhållanden, dvs. då en träpall placerats under mätinstrumentet. Mätning med respektive utan skor.

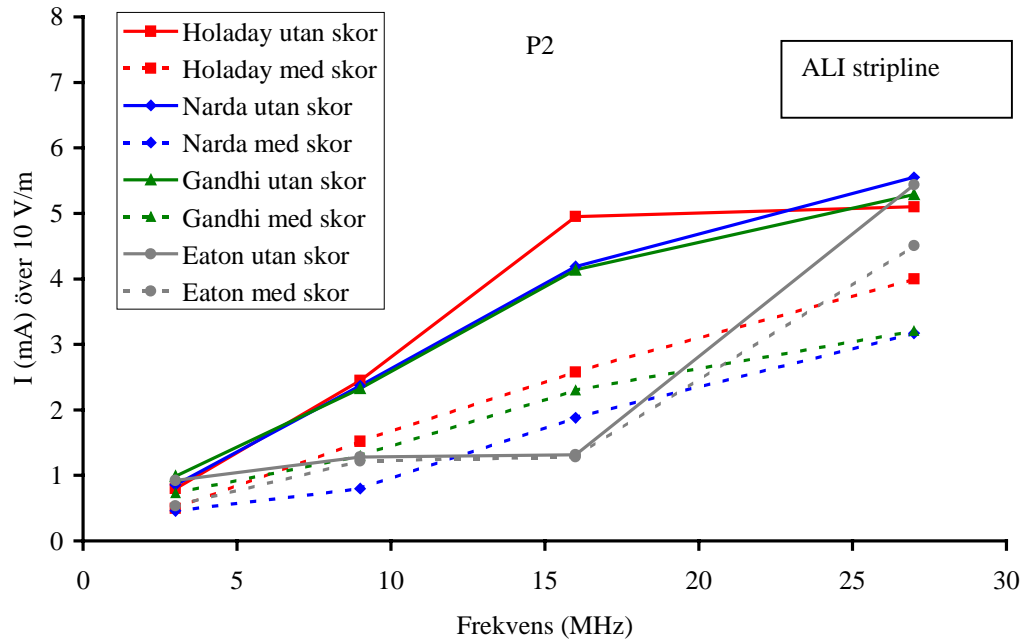
Mätinstrument: GC-2. Den elektriska fältstyrkan var 10,0 V/m i referenspunkten vid varje mätning.

f (MHz)	P1		P3		P9		P10	
	utan skor	med skor	utan skor	med skor	utan skor	med skor	utan skor	med skor
3	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5
6	14	27	14	13	14	19	14	15
9	6,3	3,6	5,5	2,7	5,9	3,1	5,3	2,7
16	12	8,3	11	5,9	12	7,0	11	6,3
20	65	32	79	22	60	27	52	23
27	19	14	16	11	18	13	17	12

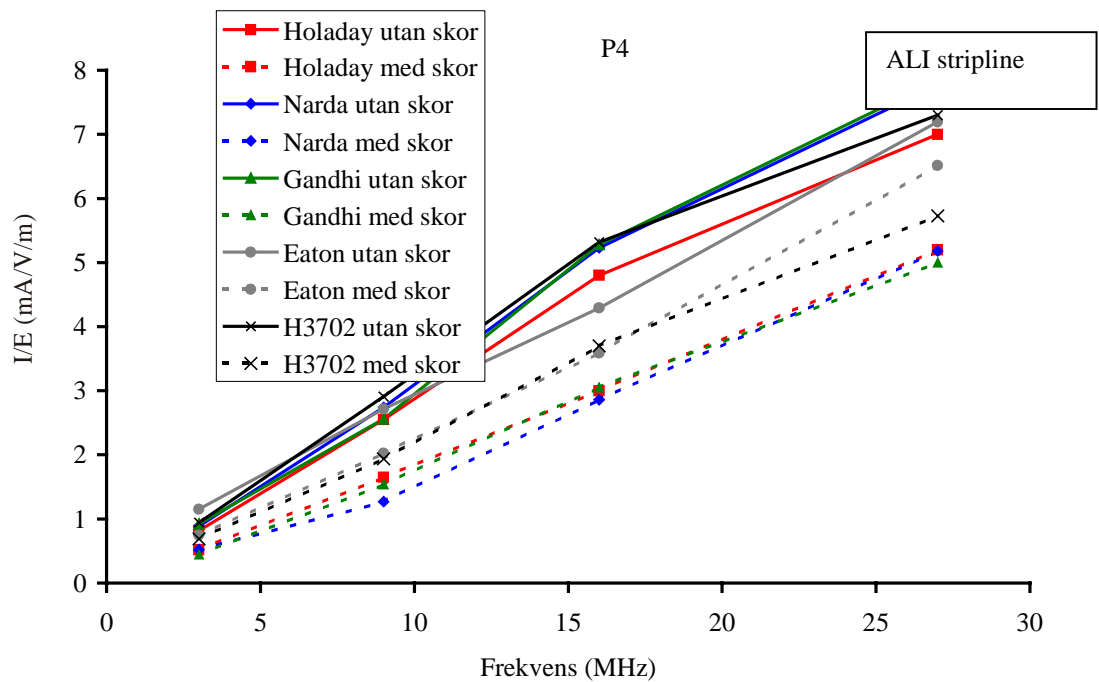
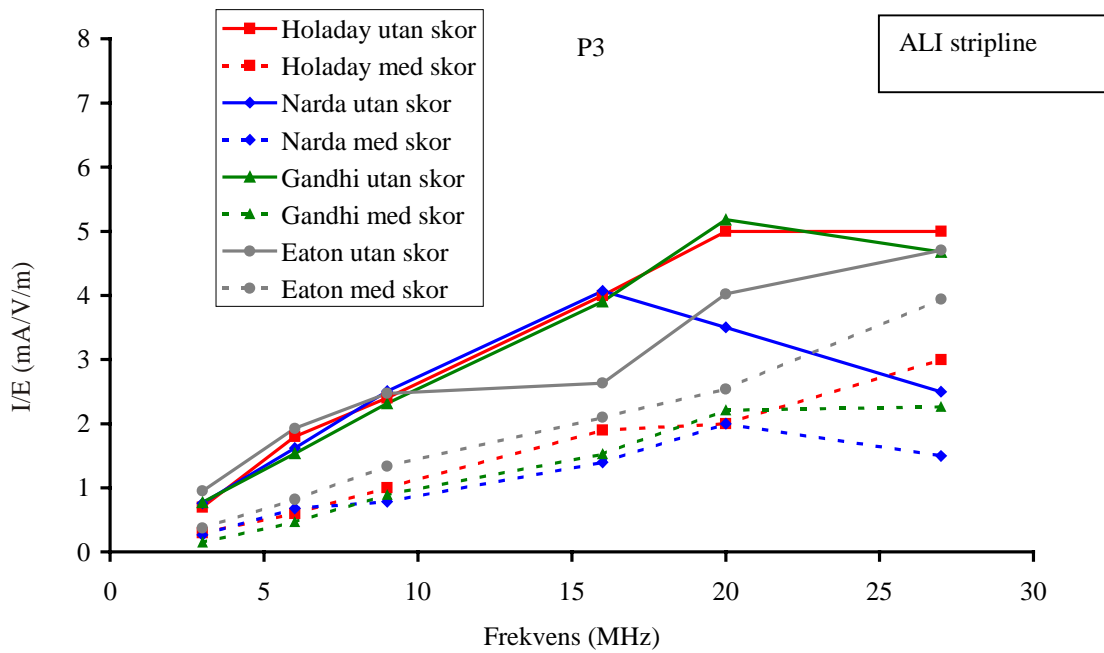
Tabell 29. Inducerad ström för försökspersonerna vid olika frekvenser, vid ojordade förhållanden, dvs. då en träpall placerats under mätinstrumentet. Mätning med respektive utan skor.

Mätinstrument: Eaton. Den elektriska fältstyrkan var 10,0 V/m i referenspunkten vid varje mätning.

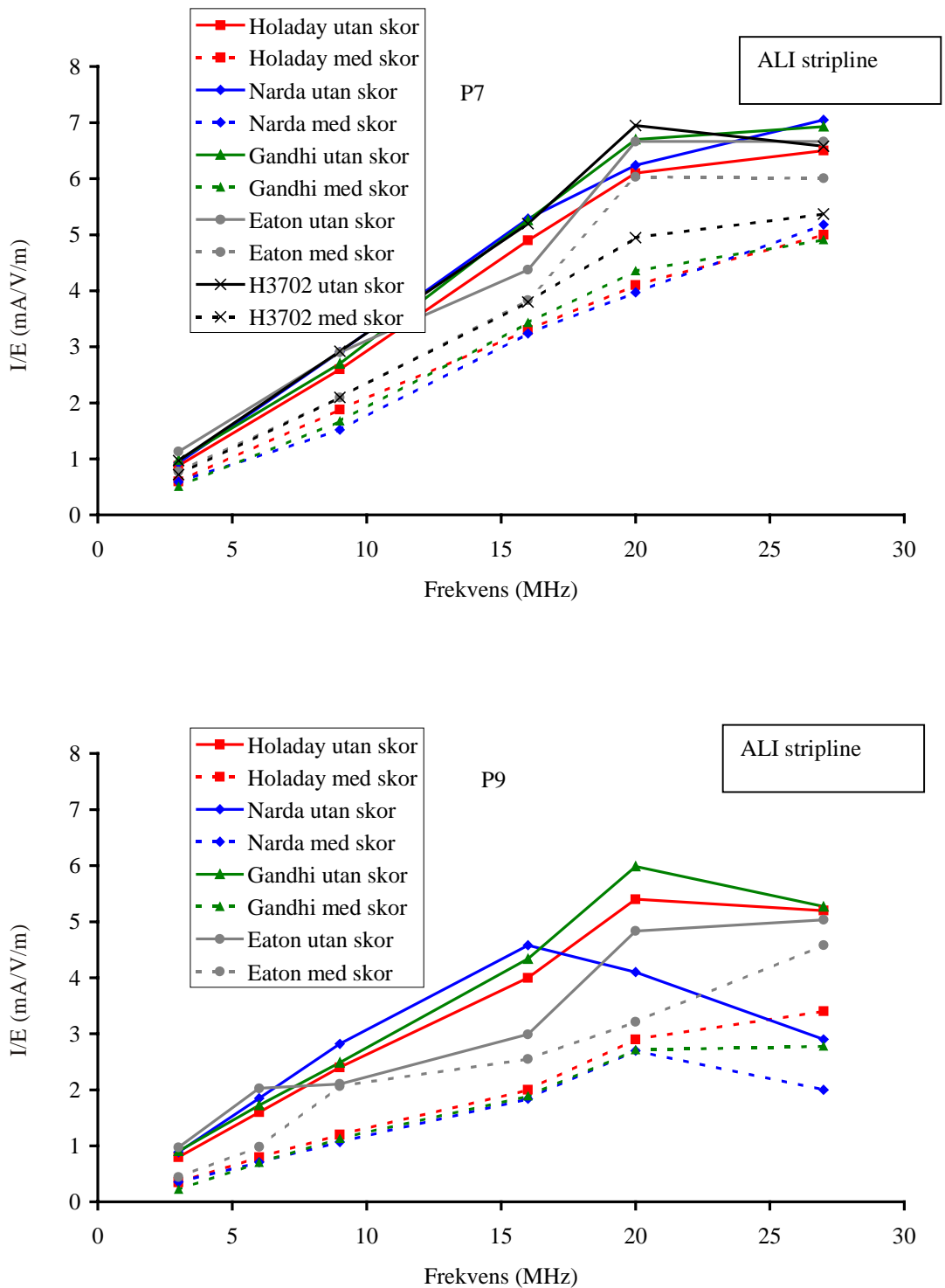
f (MHz)	P1		P3		P9		P10	
	utan skor	med skor	utan skor	med skor	utan skor	med skor	utan skor	med skor
3	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5
6	15	27	14	13	14	19	14	15
9	6,3	3,6	5,5	2,7	5,9	3,1	5,3	2,7
16	12	8,3	11	5,9	12	7,0	11	6,3
20	64	32	79	22	60	27	52	23
27	19	14	16	11	18	13	17	12



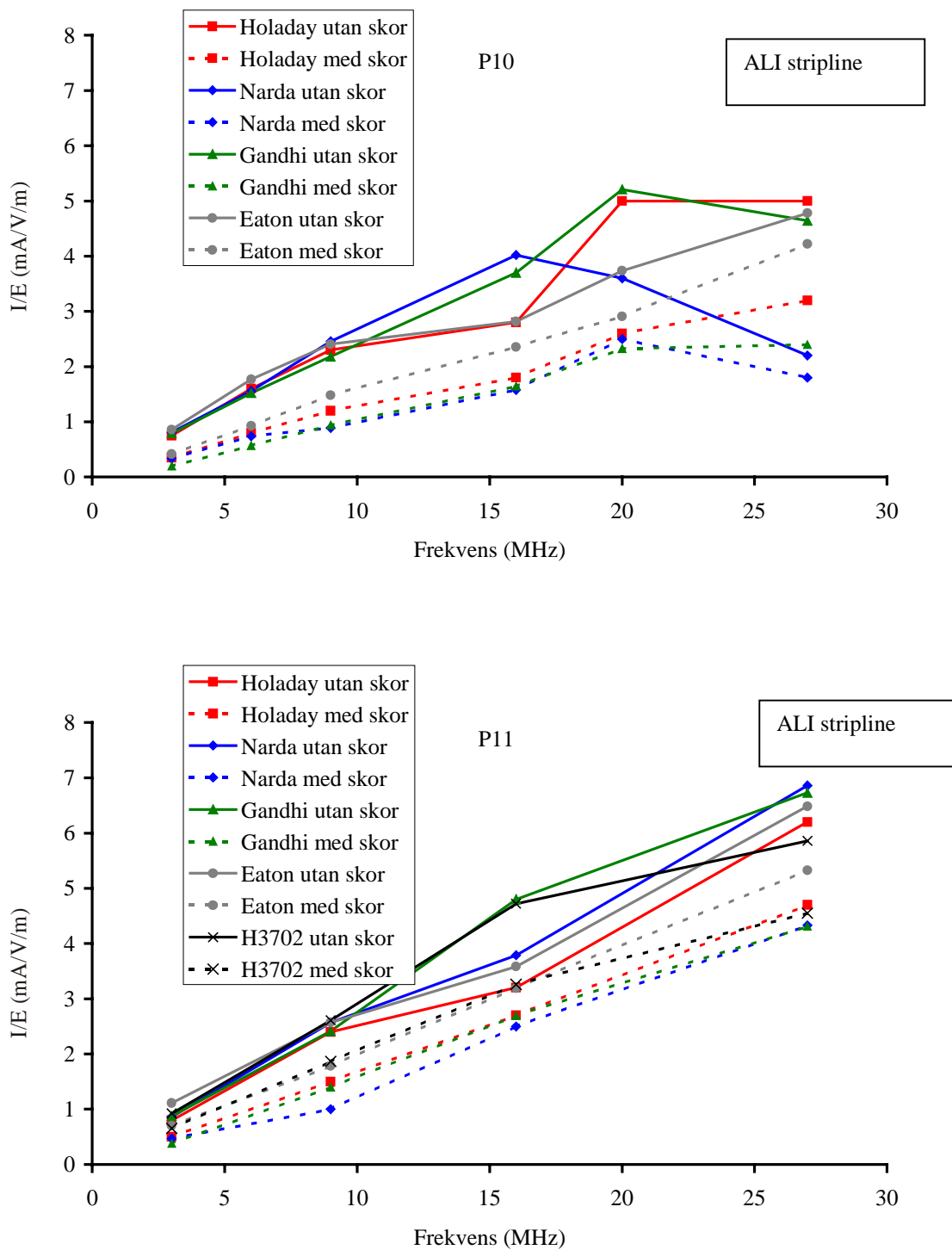
Figur 23. I/E (mA/V/m) som funktion av frekvensen för försöksperson (P2) och olika mätinstrument vid olika mätsituationer vid den laborativa mätningen vid ALI.



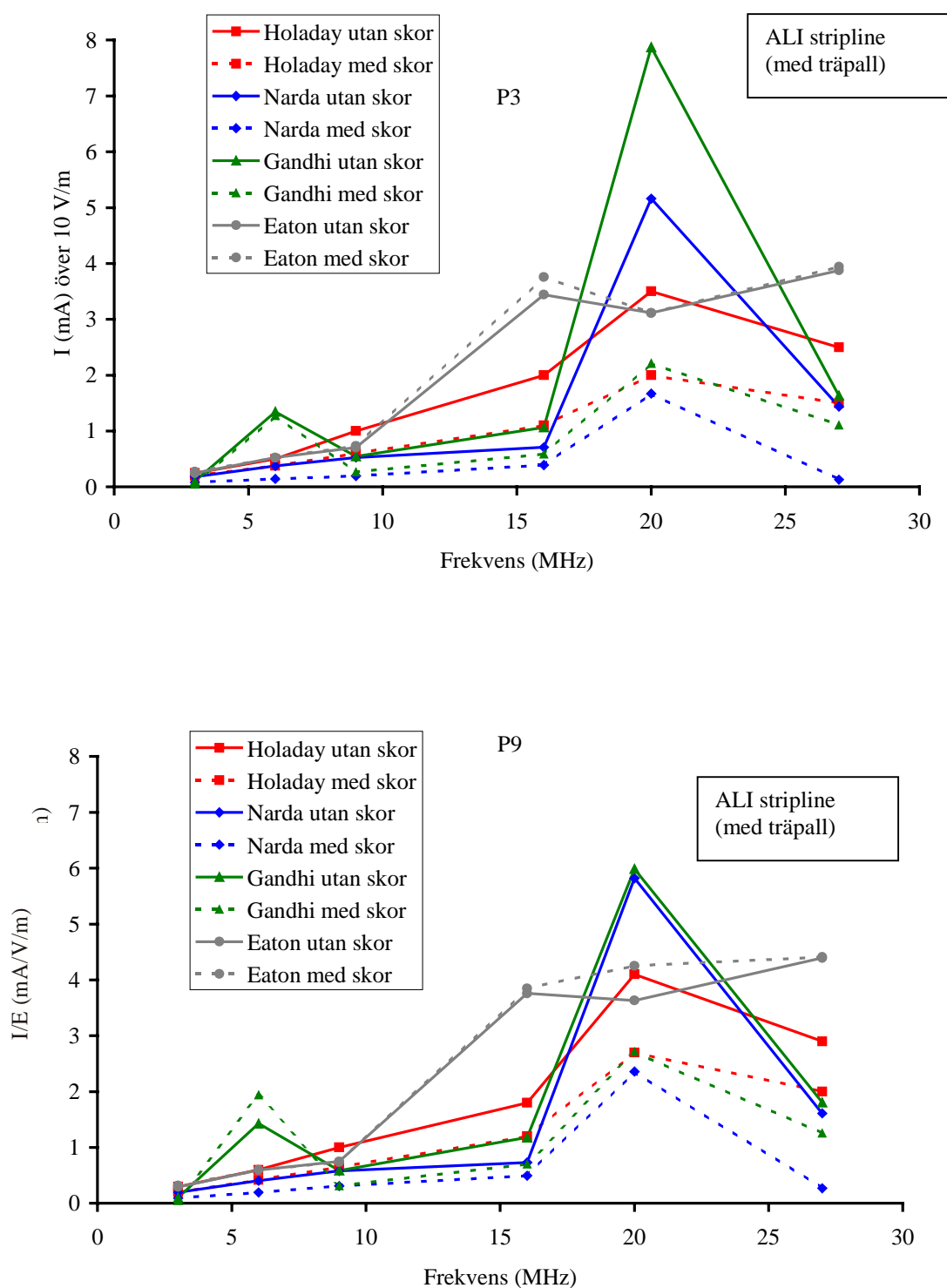
Figur 24. I/E (mA/V/m) som funktion av frekvensen för försökspersonerna (P3 och P4) och mätinstrument vid olika mätsituationer vid den laborativa mätningen vid ALI.



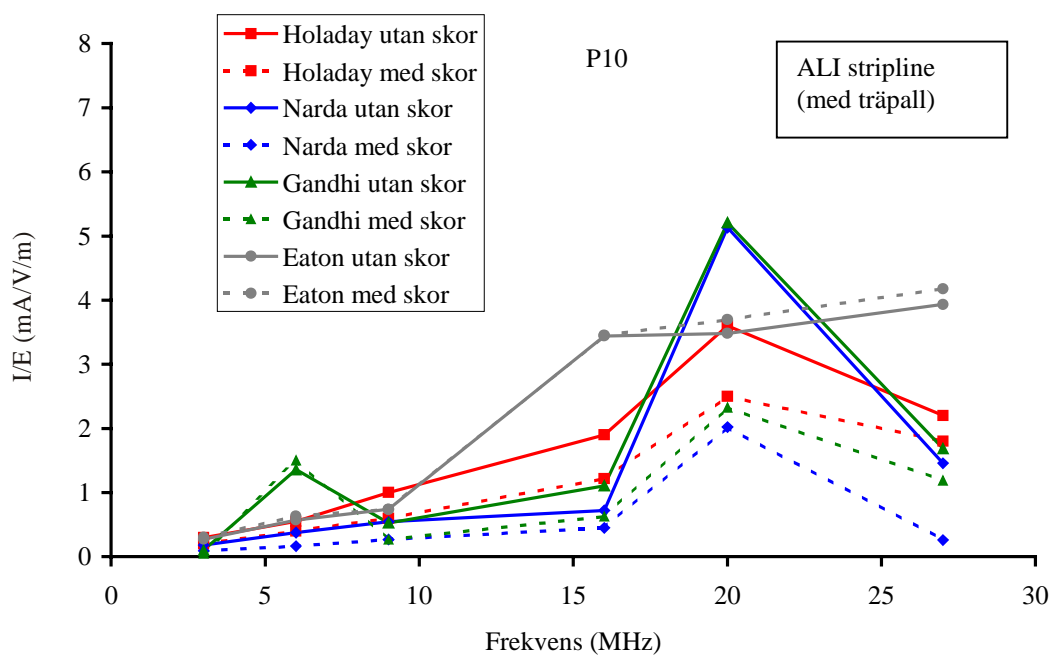
Figur 25. I/E (mA/V/m) som funktion av frekvensen för försökspersonerna (P7 och P9) och mätinstrument vid olika mätsituationer vid den laborativa mätningen vid ALI.



Figur 26. I/E (mA/V/m) som funktion av frekvensen för försökspersonerna (P10 och P11) och mätinstrument vid olika mätsituationer vid den laborativa mätningen vid ALI.



Figur 27. I/E (mA/V/m) som funktion av frekvensen för olika försökspersonerna (P3 och P9) och mätinstrument vid olika mätsituationer vid den laborativa mätningen vid ALI då en träpall placerats under mätinstrumentet. Mätning med och utan skor.



Figur 28. I/E (mA/V/m) som funktion av frekvensen för försöksperson (P10) och mätinstrument vid olika mätsituationer vid den laborativa mätningen vid ALI då en träpall placerats under mätinstrumentet. Mätning med och utan skor.