

Onderzoek naar elektromagnetische
velden in de industrie:
bronnen, meetprocedures en regelgeving

Eindverslag

N° NM/02/18

Wout JOSEPH & Luc MARTENS

INTEC
UNIVERSITEIT GENT
St-Pietersnieuwstraat 41
B-9000 Gent
Tel. +32 9 264.33.16
Fax +32 9 264.35.93
E-mail : luc.martens@intec.Ugent.be

INHOUDSOPGAVE

Inhoudsopgave.....	1
Samenvatting	1
A. Context.....	1
B. Doelstellingen.....	1
C. Besluiten.....	3
D. Bijdrage van het project in een context van ondersteuning aan het proces inzake normalisatie en technische regelgeving	4
E. Trefwoorden	5
Resume.....	6
A. Contexte.....	6
B. Objectifs	6
C. Conclusions.....	7
D. Apport du projet dans un contexte d'appui aux processus de normalisation et de réglementations techniques	9
E. Mots-clés	9
Summary.....	10
A. Context.....	10
B. Objectives.....	10
C. Conclusions.....	11
D. Contribution of the project in a context of support to the processes of standardisation and technical regulations	13
E. Keywords.....	14
1 Inleiding.....	15
2 Methodologie	16
2.1 Overzicht van elektromagnetische bronnen in de industrie en selectie van de bronnen	16
2.2 Bepaling van parameters die de meetprocedure beïnvloeden.....	16
2.3 Onderzoek van meetprobes	16
2.4 Ontwikkeling van de meetprocedure	17
2.5 Praktisch toepassen van de ontwikkelde meetprocedure op antennes	20
2.6 Vergelijken van veldmetingen met simulaties	21
2.7 Vergelijking van verschillende fantomen voor SAR.....	21
2.8 Bepaling SAR in balkvormig fantoom.....	22
2.9 Bepaling van veiligheidsfactor voor SAR bepaling.....	22
2.10 Vergelijking van de veiligheidsafstanden van de SAR en van de elektromagnetische velden	22
3 Resultaten.....	24
3.1 Lijst elektromagnetische bronnen in de industrie	24
3.2 Kalibratie van meetprobes.....	26
3.2.1 Methode	26
3.2.2 Resultaten	27
3.3 Verhoging van de nauwkeurigheid van smalbandmetingen door eliminatie van het resolutiefilter van de spectrumanalyser	29
3.4 Invloed van de meetprobe.....	29
3.4.1 Methode om de invloed van de meetprobe te karakteriseren	29
3.4.2 Selectie van een geschikte meetprobe	31
3.5 Ontwikkeling van de meetprocedure	33
3.5.1 Elektromagnetische velden	33
3.5.2 Lokale SAR	34
3.5.3 Totale-lichaams SAR	35
3.5.4 Meetrapport.....	35

3.6	Nieuwe methode om nauwkeurig en goedkoop nabije-veldmetingen in de buurt van een antenne uit te voeren.....	37
3.6.1	Methode	37
3.6.2	Resultaten	40
3.7	Ontwikkeling van SAR meetprocedure en vergelijking SAR metingen en simulaties	42
3.7.1	Configuratie.....	42
3.7.2	Methode	43
3.7.3	Resultaten	45
3.8	Vergelijking veiligheidsafstanden van elektromagnetische velden en van SAR	49
3.8.1	Lokale SAR	49
3.8.2	EM velden	49
3.8.3	Vergelijking van D_{voor} via E-veld en via SAR	52
3.8.4	Strengheidsparameter SP	53
3.9	Nieuwe veiligheidsfactor voor de bepaling van de SAR in een fantoom	57
3.9.1	Realistisch mensmodel	57
3.9.2	Vergelijking tussen de verschillende modellen	59
4	Verspreiding en valorisatie.....	61
5	Balans en perspectieven.....	62
	Dankwoord	63
	Referenties.....	64

SAMENVATTING

A. Context

In de industrie zijn veel bronnen van elektromagnetische straling aanwezig. Ondanks het feit dat in de internationale literatuur reeds potentieel gevaar voor de gezondheid van arbeiders gemeld is wordt er weinig aandacht besteed aan dit probleem of is er totale onwetendheid. Op het gebied van normering en technische regelgeving was er bij aanvang van dit project niets van kracht in België en zelfs internationaal. Er zijn wel limieten voor elektromagnetische straling in arbeidsomgeving gedefinieerd maar er was geen procedure ter controle van die limieten gestandaardiseerd. Dit project levert dus een bijdrage tot de standaardisatie van de acquisitie van elektromagnetische velden in de industrie. Dit leidt tot procedures die kunnen gebruikt worden voor verificatie van de limieten.

B. Doelstellingen

Het doel van dit project was het ontwikkelen van een meetprocedure voor elektromagnetische velden in de industrie. De karakterisering zal uiteindelijk gebruikt worden om na te gaan of arbeiders veilig kunnen werken in de uitgestraalde elektromagnetische velden. Om dit te realiseren hebben we verschillende doelstellingen uitgewerkt. Deze doelstellingen worden hieronder beschreven.

Het eerste doel is het geven van een overzicht van de elektromagnetische bronnen in de industrie. Al de bronnen die in deze lijst staan komen in België voor. Uit de inventaris van de bronnen, zal blijken dat deze bronnen zodanig divers zijn dat het onmogelijk is één enkele meetprocedure voor alle bronnen te ontwikkelen. Daarom hebben we ons tot doel gesteld een meetprocedure te ontwerpen die kan gebruikt worden in het frequentiegebied 110 MHz tot 10 GHz en kan toegepast worden op de meest voorkomende bronnen in de industrie nl. antennes, b.v. antennes in de telecommunicatie-industrie.

Deze procedure wensen we dan praktisch toe te passen op een typische basisstationantenne (we hebben gekozen voor de Kathrein 736863 GSM antenne). Op basis van deze toepassing zullen dan aanpassingen aan de procedure worden voorgesteld.

Het volgende doel is het bepalen van de parameters die de meetprocedure beïnvloeden.

Om de verschillende grootheden (elektromagnetische velden, "Specific Absorption Rate" of SAR) te bepalen en te meten moeten ook de karakteristieken van de meetprobes bekeken worden. Eveneens moet de keuze van de meetprobe besproken worden en zal er een vergelijking gebeuren met commercieel beschikbare apparatuur.

Een zeer belangrijk aspect is de kalibratie van de meetprobes. Daarom is er in het kader van dit project tot doel gesteld een nauwkeurige kalibratiemethode te ontwikkelen. Om elektromagnetische velden (EM velden) te meten, moet men deze velden omzetten naar elektrische grootheden zoals spanning en stroom, die dan m.b.v. algemeen gebruikte meettoestellen (zoals spanningsmeters en spectrumanalysers) kunnen gemeten worden. Kalibratie omvat het bepalen van deze omzetting.

We wensen nauwkeurige en correcte smalbandmetingen uit te voeren. Daarom werd in het kader van dit project een studie uitgevoerd om de nauwkeurigheid van de smalbandmetingen te verhogen. Wanneer metingen met een spectrumanalyser uitgevoerd worden krijgen we een vertekend beeld van het opgemeten signaal door de invloed van de resolutiefilter van de spectrumanalyser. Hoe groter de resolutiebandbreedte van deze filter, hoe groter de overschatting van het gemeten vermogen zal zijn. Het doel van de meting is om de correcte veldwaarden direct op de meetplaats zelf te bepalen. Dus moet de overlap door de resolutiefilter geëlimineerd worden en daarvoor is een snel en geautomatiseerd deconvolutie-algoritme noodzakelijk. Bovendien moet het algoritme robuust zijn door de aanwezigheid van ruis.

We hebben ons ook tot doel gesteld de invloed van de meetprobe zelf te karakteriseren. Om na te gaan of de blootstelling ten gevolge van elektromagnetische straling voldoet aan de normen moeten de velden nauwkeurig opgemeten worden. Om een elektromagnetisch veld te meten zullen we een meetprobe in dat veld moeten brengen. Door de meetprobe in het veld te brengen zal dit veld verstoord worden en zal niet het oorspronkelijke veld maar het verstoorde veld gemeten worden. Dus de meetprobe zelf zorgt voor verstoring en die moet gekarakteriseerd worden.

Het is dus belangrijk om nauwkeurige veldmetingen dicht bij de bron te kunnen uitvoeren. Zowel het elektrisch als het magnetisch veld moeten bepaald worden voor metingen in het nabije veld van een basisstation. Meestal worden dergelijke metingen uitgevoerd in een anechoïsche kamer die zeer duur is. Wij wensen de metingen uit te voeren in een binnenshuis open-site omringd met absorbers om de reflecties te minimaliseren. Om dan nauwkeurige resultaten te bekomen moeten de residuele reflecties geëlimineerd worden door een de-embedding methode te gebruiken. Ons doel is dus een goedkope methode te ontwikkelen (geen zeer dure anechoïsche kamer nodig) die nauwkeurige resultaten levert.

Niet alleen de elektromagnetische velden moeten worden bepaald maar eveneens de SAR moet worden bepaald. Maar om de SAR te bepalen moet een fantoom gebruikt worden. Het doel is verschillende fantomen voor de bepaling van de SAR te vergelijken en een bepaald type fantoom voor te stellen om de metingen praktisch mee uit te voeren.

We wensen een goede overeenkomst te bekomen tussen metingen en simulaties (zowel voor EM metingen als SAR metingen) om op deze manier betrouwbare resultaten te bekomen en een praktisch bruikbaar model voor de GSM antenne te hebben.

Het is eveneens de bedoeling de SAR in een realistisch mensmodel te bepalen en deze waarden te vergelijken met de SAR waarden bekomen in verschillende types van fantomen (modellen van de mens). Het is dan de bedoeling een veiligheidsfactor te definiëren die afhankelijk is van de frequentie en van het gebruikte fantoom.

Het is de bedoeling de veiligheidsafstanden bekomen voor de veldwaarden te vergelijken met de veiligheidsafstanden bekomen voor de lokale en totale-lichaams SAR. De veiligheidsafstanden zullen bepaald worden voor een typische GSM antenne voor verschillende ingangsvermogens die in België worden gebruikt. Tenslotte is het ons doel te bepalen vanaf welke afstand het voldoende is om enkel EM veldmetingen uit te voeren om de strengste veiligheidsvoorwaarden te bekomen. SAR metingen zijn zeer duur en tijdsintensief en het zou dus interessant zijn geen

SAR metingen uit te hoeven voeren om de strengste veiligheidsafstanden te kennen op een bepaalde positie.

C. Besluiten

In [Joseph et al. (2000)] werd een lijst opgesteld van elektromagnetische bronnen in de industrie in België. De frequenties en typische ingangsvermogens van de verschillende bronnen werden gegeven. De parameters die de meetprocedure beïnvloeden werden in [Joseph et al. (2001a)] onderzocht.

We hebben een nauwkeurige en consequente kalibratiemethode ontwikkeld die gebaseerd is op de 3-antenne methode [Joseph et al. (2001c)], [Joseph et al. (2001d)] en [Joseph et al. (2001e)]. Onze methode met gebruik van de inverse FFT levert de beste resultaten met een maximale afwijking van slechts 0,49 dB en een gemiddelde afwijking van slechts 0,15 dB voor een conische dipoolantenne wanneer antennes met een totaal verschillende antennefactor worden gebruikt. Deze methode hoeft niet in een anechoïsche kamer te worden uitgevoerd. Dit resulteert in een nauwkeurige en goedkope kalibratiemethode. Het Oostenrijkse Onderzoekscentrum Seibersdorf specificeerde de antennefactor met een onzekerheid van ± 1 dB. Bijgevolg liggen al de frequentiepunten binnen dit onzekerheidsinterval wanneer de inverse FFT wordt gebruikt.

We hebben een algoritme ontwikkeld om de nauwkeurigheid van smalbandmetingen met een spectrumanalyser te verhogen in [Joseph et al. (2002e)]. Dit algoritme voldoet aan de eisen in paragraaf B (resolutiefilter van spectrumanalyser elimineren, correcte veldwaarden direct op de meetplaats zelf te bepalen, snel en geautomatiseerd en robuust voor ruis) door gebruik te maken van een vensterfunctie (windowing) en filtering. Door een bijkomende convolutie met een blok golf wordt de aanwezige ruis gereduceerd. Het is zelfs toepasbaar voor signaal-tot-ruis verhoudingen $\text{SNR} = 3$.

We hebben de invloed en verstoring van de meetprobe gekarakteriseerd in [Joseph et al. (2001c)], [Joseph et al. (2003b)], [Joseph et al. (2002c)] en [Joseph et al. (2002d)]. We wensen dat de verstoring minder dan 5 % bedraagt. Voor verre-veldmetingen zal een dipool met lengte $\lambda/2$ en met straal van de dikte 1,8 mm voldoen aan deze eis. Een $\lambda/2$ -dipool heeft een zeer hoge sensitiviteit wat nodig is voor verre-veldmetingen door de lage veldwaarden die er optreden. Voor nabije veldmetingen echter zal de $\lambda/2$ -dipool door zijn grote afmetingen een verstoring hebben die hoger ligt dan 5 %. Dit kan opgelost worden door een kleinere meetprobe te gebruiken. Een kleinere meetprobe zal een betere spatiale resolutie hebben die nodig is om de snelveranderende veldwaarden in het nabije veld op te meten. Een nadeel is echter dat een kleinere probe minder sensitief zal zijn (de antennefactor ligt hoger). Om een verstoring van minder dan 5 % en maximale sensitiviteit te bekomen werd een ontwerp van de dimensie van de meetprobe gemaakt door simulaties uit te voeren. Dit resulteerde in een meetprobe met lengte $\lambda/4$. De ontwikkelde procedure laat toe probes te selecteren met minimale verstoring en maximale sensitiviteit.

In [Joseph et al. (2001b)] hebben we een procedure ontwikkeld voor labo-omstandigheden om de veiligheidsafstanden van een EM bron te bepalen in het frequentiegebied 110 MHz tot 10 GHz. Om de veiligheidsafstanden te bepalen kunnen er dus twee routes gevolgd worden : de route van de elektromagnetische velden en de route van de Specific Absorption Rate (SAR). Beiden worden in [Joseph et al. (2001b)] onderzocht.

In [Joseph et al. (2003d)] hebben we een goedkope – er is immers geen anechoïsche kamer nodig – en nauwkeurige methode ontwikkeld voor metingen in de buurt van een basisstationantenne. De veiligheidsafstanden werden voor verschillende ingangsvermogens bepaald. Er is een uitstekende overeenkomst tussen metingen en simulaties voor zowel het elektrisch als magnetisch veld. Voor het elektrisch veld zijn de maximale en gemiddelde afwijking tussen de gesimuleerde en opgemeten waarden van E^{vlak} (i.e. het veld uitgemiddeld in een vlak) respectievelijk 6,8 % en 2,8 %. De maximale en gemiddelde afwijking tussen de gesimuleerde en opgemeten waarden van E^{vol} (uitmiddeling van het veld in een volume) zijn respectievelijk 2,8 % en 2,1 %. Dit zijn veel lagere waarden dan tot nu toe in de literatuur gepubliceerd.

We hebben in [Joseph et al. (2002b)] en [Joseph et al. (2003a)] een meetprocedure voor de lokale SAR in een balkvormig fantoom ontwikkeld en SAR metingen en simulaties in een balkvormig fantoom bij een K736863 antenne vergeleken. Er is een goede overeenkomst tussen beiden. Ook de metingen en simulaties van de EM velden leveren een goede overeenkomst.

In [Joseph et al. (2003a)] en [Joseph et al. (2003c)] worden de veiligheidsafstanden van de lokale SAR (10 g) en het E-veld vergeleken. Voor de SAR is een veiligheidsfactor 3 bij 947,5 MHz voor het balkvormig fantoom in rekening gebracht. Vanaf 2,3 cm ($<\lambda/10$) levert het in een volume uitgemiddeld elektrisch veld (voor de K736863 antenne) steeds de grootste veiligheidsmarges en moet zowel de lokale als de totale-lichaams SAR niet bepaald worden om de strengste veiligheidsafstanden te kennen.

Wanneer uitgemiddeld wordt in een vlak of de maximale veldwaarde gekozen wordt zal het elektrisch veld bij 10 en 20 W steeds de strengste veiligheidsafstanden leveren. Bij 10 en 20 W bedraagt de maximale veiligheidsafstand voor de K736863 antenne respectievelijk 15,7 cm en 30,4 cm. Dit zijn afstanden die veel kleiner zijn dan de in de praktijk gehanteerde veiligheidsmaatregelen [GOF (2002)].

Er werden FDTD-simulaties (vlakke golven) uitgevoerd met een realistisch mensmodel en op basis van deze simulaties werd een veiligheidsfactor [Joseph et al. (2003e)] ingevoerd. De veiligheidsfactor is zowel van de *frequentie* als van het *type fantoom* afhankelijk en is verschillend van de arbitraire factor 2 voorgesteld door [CENELEC (2002)]. Bij b.v. 947,5 MHz is deze veiligheidsfactor 3 voor het balkvormig fantoom dat wegens de eenvoudige vorm en homogeniteit lagere SAR waarden levert dan een realistisch mensmodel. De bijkomende "correctiefactor" 2 waarmee de lokale SAR moet vermenigvuldigd worden volgens [CENELEC (2002)] blijkt dus niet een goede keuze te zijn.

D. Bijdrage van het project in een context van ondersteuning aan het proces inzake normalisatie en technische regelgeving

Er waren in het kader van dit project bijdragen en aanbevelingen voor de standaardisatie-organisatie CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardization) technisch comité TC106 voor de basisstationstandaarden put-into-service (EN50XXX) en put-into-field (EN50YYY).

Er waren eveneens bijgedragen in de technische werkgroepen van het Europese COST project COST281 (www.cost281.org). In dit project wordt er samengewerkt met Europese en internationale organisaties zoals WHO, ICNIRP, NRPB en CENELEC die zich ook bezig houden met standaarden en normen.

Verder worden de resultaten doorgegeven aan het BIN (Belgisch Instituut voor Normalisatie).

De resultaten van dit project worden zowel op nationale als internationale conferenties gepresenteerd en in internationale tijdschriften gepubliceerd. Drie artikels zijn gepubliceerd in A1-tijdschriften: 2 in IEEE Transactions [Joseph et al. (2002e)], [Joseph et al. (2003b)] en 1 in IEE Electronics Letters [Joseph et al. (2003d)]. Deze tijdschriften zorgen voor een grote verspreiding en hebben een hoge impact.

Verder zijn er 7 conferentieartikels gepubliceerd [Joseph et al. (2001c)], [Joseph et al. (2001d)], [Olivier et al. (2001)], [Joseph et al. (2002c)], [Joseph et al. (2002d)], [Martens et al. (2002)], [Joseph et al. (2003c)] en zijn er nog 2 artikels opgestuurd naar wetenschappelijke tijdschriften [Joseph et al. (2001e)], [Joseph et al. (2003e)].

De resultaten werden gerapporteerd d.m.v. halfjaarlijkse tussentijdse rapporten en de resultaten werden gepresenteerd voor een begeleidingscommissie met als leden: Buyse Dany (Agoria), Calderone Anna (Federaal Wetenschapsbeleid), Nicolas Jacques (MINECO), Niemegeers Philippe (Proximus) en Van Den Bossche Stefan (Mobistar).

Agoria vertegenwoordigt in België de technologische industrie. Door hun lidmaatschap in andere Europese standaardisatieorganisaties zoals ETSI (European Telecommunication Standardisation Institute) kan dit projectwerk verder worden geïntroduceerd voor standaardisatie. Door de aanwezigheid van de heer Nicolas van het “Ministerie van Economische Zaken, Metrologische dienst” kan dit projectwerk worden geïntroduceerd in bijvoorbeeld het Belgisch Instituut voor Normalisatie (BIN).

E. Trefwoorden

Elektromagnetisch veld, meting, beroepsblootstelling, meetprobe, antenne, dipool, GSM, UMTS, RF bron, kalibratie, netwerkanalyser, spectrumanalyser, resolutiefilter, deconvolutie, probe verstoring, nabije veld, verre veld, anechoïsche kamer, de-embedding, Specific Absorbition Rate, SAR, veiligheidsafstand, veiligheidsgrens, fantoom, veiligheidsfactor.

RESUME

A. Contexte

Dans l'industrie, il y a beaucoup de sources de radiation. Malgré le fait que dans la littérature un risque potentiel est mentionné, on n'a pas prêté beaucoup d'attention à ce problème pour lequel il y a un déficit complet d'information.

Au début du projet, il n'existait aucune loi de normalisation ou réglementation technique belge ou internationale. Plus spécifiquement, des limites pour la radiation électromagnétique ont été proposées mais il n'y pas de procédure standardisée pour contrôler ces limites. Ce projet contribuera à la standardisation de l'acquisition des champs électromagnétiques dans l'industrie. Sur base de l'acquisition des champs électromagnétiques, une réglementation de la radiation électromagnétique des appareils industriels pourra être développée. Les procédures dans les réglementations peuvent être utilisées pour vérifier les limites.

B. Objectifs

L'objectif du projet était le développement d'une procédure pour mesurer les champs électromagnétiques. La caractérisation sera utilisée pour vérifier si les travailleurs ne sont pas trop exposés aux champs électromagnétiques. Nous avons défini différentes tâches pour réaliser cet objectif.

Pour être capable de définir une procédure de mesure, nous dresserons une liste des sources électromagnétiques. A cause de la grande diversité des sources électromagnétiques, il est impossible de développer une seule procédure pour toutes les sources. C'est pourquoi nous avons l'intention de développer une procédure de mesure pour les fréquences 110 MHz à 10 GHz. Cette procédure peut être utilisée pour les sources les plus courantes, c'est-à-dire les antennes, par exemple les antennes de la télécommunication.

Nous voulons appliquer cette procédure à une station de base GSM typique (K736863). Sur base de l'application pratique, des adaptations seront proposées.

L'objectif suivant est la détermination des paramètres qui influencent la procédure de mesure.

Pour déterminer et mesurer les quantités différentes (champs électromagnétiques, Débit d'Absorption Spécifique ou DAS, en anglais Specific Absorption Rate ou SAR), les caractéristiques des sondes de mesure doivent être examinées.

Le calibrage des sondes de mesure est très important. C'est pourquoi nous voulons développer une méthode de calibrage précise. Pour mesurer les champs électromagnétiques, on doit les convertir en quantités électriques comme le voltage et le courant, qui peuvent être mesurés avec des voltmètres et des analyseurs de spectre. Le calibrage comprend la détermination de cette conversion.

Nous voulons exécuter des mesures à bande étroite précises et correctes. C'est pourquoi une étude pour augmenter la précision des mesures est nécessaire. Quand on mesure avec un analyseur de spectre, une surestimation de la puissance mesurée est possible. Au plus large la largeur de bande, au plus la surestimation sera importante. Notre objectif est la détermination immédiate des valeurs des

champs. C'est pourquoi nous avons besoin d'un algorithme de déconvolution précis, rapide et automatique. De plus, l'algorithme doit être robuste à cause du bruit.

Notre but est aussi de caractériser l'influence de la sonde de mesure. Quand on effectue des mesures, le champ électromagnétique sera perturbé par la sonde de mesure elle-même. C'est pour cette raison que non le champ réel mais le champ perturbé sera mesuré. La sonde de mesure elle-même cause donc une perturbation qui doit être caractérisée.

Pour vérifier si l'exposition à la radiation électromagnétique satisfait aux normes, il est nécessaire d'être capable de déterminer les champs d'une manière précise. Le champ électrique ainsi que le champ magnétique doivent être déterminés pour des mesures dans le champ proche d'une station de base. En général, les mesures de la radiation d'une antenne sont effectuées dans une chambre anéchoïque, qui est très coûteuse. Nous voulons exécuter des mesures dans un site ouvert intérieur. Pour obtenir des résultats précis, les réflexions résiduelles doivent être éliminées par une méthode de "de-embedding". Notre objectif est donc de développer une méthode à coûts réduits qui produit des résultats précis.

Pour déterminer les distances de sécurité, on doit déterminer les champs électromagnétiques ainsi que le DAS (Débit d'Absorption Spécifique). Pour déterminer le DAS, on a besoin d'un fantôme. C'est pour cette raison qu'il est nécessaire de comparer différents fantômes. Nous proposerons un type de fantôme pour exécuter les mesures.

Nous désirons une concordance entre les mesures et les simulations (champ électromagnétique et DAS). Ainsi nous aurons des résultats précis et un modèle pratique d'une antenne GSM.

Notre objectif sera de comparer les distances de sécurité des champs électromagnétiques avec les distances de sécurité du DAS local et du DAS corps-entier. Nous examinerons une station de base GSM typique pour différentes puissances utilisées en Belgique.

Enfin, la détermination du DAS est coûteuse et les mesures prennent beaucoup de temps. Il est donc intéressant de déterminer la distance à partir de laquelle le champ électromagnétique donne toujours des distances de sécurité plus restrictives et où il n'est donc plus nécessaire de déterminer le DAS pour obtenir des distances de sécurité plus restrictives.

C. Conclusions

Nous avons dressé la liste des sources électromagnétiques dans l'industrie en Belgique dans [Joseph et al. (2000)]. Les fréquences et les puissances des sources différentes sont rapportées. Les paramètres qui influencent la procédure de mesure sont examinés [Joseph et al. (2001a)].

Nous avons développé une méthode améliorée pour le calibrage des sondes de mesure [Joseph et al. (2001c)], [Joseph et al. (2001d)] et [Joseph et al. (2001e)]. Notre méthode qui utilise la FFT inverse donne les meilleurs résultats avec une déviation maximale de seulement 0,49 dB et une déviation moyenne de seulement 0,15 dB pour une antenne dipôle conique quand des antennes avec un facteur d'antenne de réception (AF) complètement différent sont utilisées. La méthode ne doit pas être effectuée dans une chambre anéchoïque. Il en résulte que notre méthode offre un coût réduit. Le Centre de Recherche autrichien a spécifié le facteur

d'antenne avec une incertitude de ± 1 dB. Nos résultats se trouvent donc dans cet intervalle d'incertitude.

Nous avons développé un algorithme robuste, précis et rapide pour augmenter la précision des mesures à bande étroite avec un analyseur de spectre [Joseph et al. (2002e)]. Cet algorithme de déconvolution satisfait aux exigences du paragraphe B. Nous utilisons une fonction de fenêtre (windowing) et filtrage. Nous avons appliqué la méthode aux signaux de GSM et UMTS et nous avons prouvé que la méthode est applicable pour un SNR = 3.

Nous avons présenté la caractérisation de l'influence et de la perturbation de la sonde de mesure dans [Joseph et al. (2001c)], [Joseph et al. (2003b)], [Joseph et al. (2002c)] et [Joseph et al. (2002d)]. Nous souhaitons une perturbation inférieure à 5 %. Dans le champ lointain un dipôle demi-onde satisfait cette exigence. Un dipôle demi-onde a une grande sensibilité, nécessaire pour des mesures dans le champ lointain où les valeurs de champ sont basses. Dans le champ proche, un dipôle demi-onde donnera une perturbation de plus de 5 % à cause de sa grande dimension. Il est possible de résoudre ce problème en utilisant une sonde de mesure plus petite. Une sonde de mesure plus petite aura une meilleure résolution spatiale mais sa sensibilité sera plus basse. Pour avoir une perturbation de moins de 5 % et obtenir une sensibilité maximale, nous avons optimisé les dimensions de la sonde. Le résultat est une sonde de mesure avec une longueur de $\lambda/4$. La procédure permet de sélectionner des sondes avec une perturbation minimale et une sensibilité maximale.

Dans [Joseph et al. (2001b)] nous avons développé une procédure pour des mesures en laboratoire. Ainsi nous pouvons déterminer les distances de sécurité d'une source électromagnétique pour les fréquences de 110 MHz à 10 GHz. Pour déterminer les distances de sécurité deux voies peuvent être suivies: la voie des champs électromagnétiques et la voie du DAS.

Nous avons développé une méthode précise à coûts réduits pour des mesures près d'une station de base [Joseph et al. (2003d)]. Les zones de sécurité sont déterminées pour plusieurs puissances. Une excellente concordance entre les mesures et les simulations est rapportée. Le maximum et la moyenne de la déviation relative de E^{plan} (la moyenne des valeurs du champ dans un plan) sont respectivement de 6,8 % et 2,8 %. Le maximum et la moyenne de la déviation relative de E^{vol} (moyenne des valeurs du champ dans un volume) sont respectivement de 2,8 % et 2,1 %. Ces déviations sont très petites par rapport aux incertitudes publiées dans la littérature.

Nous avons développé dans [Joseph et al. (2002b)] et [Joseph et al. (2003a)] une procédure de mesure pour le DAS local dans un fantôme rectangulaire. Nous avons comparé les mesures du DAS avec les simulations du DAS près d'une antenne K736863. Une bonne concordance est rapportée. Nous devons mentionner qu'un fantôme sphéroïdal donne par sa courbe des valeurs de DAS plus hautes qu'un fantôme rectangulaire.

Dans [Joseph et al. (2003a)] et [Joseph et al. (2003c)], les distances de sécurité pour le DAS local et le champ électrique sont comparées. Pour le DAS, nous tenons compte d'un facteur de sécurité de 3 pour un fantôme rectangulaire à 947,5 MHz. Dès 2,3 cm ($< \lambda/10$), le champ électrique E^{vol} (la moyenne dans un volume) donne les plus grandes distances de sécurité et donc dès cette distance, il n'est pas nécessaire de déterminer le DAS local et le DAS corps-entier pour obtenir les distances de sécurité plus restrictives.

Quand le champ maximum ou E^{plan} est choisi, le champ électrique donnera toujours les distances de sécurité les plus restrictives. A 10 et 20 W, les distances de sécurité maximales pour l'antenne K736863 sont respectivement de 15,7 et 30,4 cm. Ces distances sont plus petites que les mesures de sécurité en Belgique [GOF (2002)]. Nous avons examiné l'excitation par onde plane avec un modèle humain réaliste. Sur base des simulations, un facteur de sécurité est défini [Joseph et al. (2003e)]. Le facteur dépend de la fréquence et du type de fantôme. Nos résultats montrent que le facteur arbitraire de [CENELEC (2002)] n'est pas un bon choix. Le facteur de sécurité est par exemple 3 au lieu de 2 pour le fantôme rectangulaire à 947,5 MHz.

D. Apport du projet dans un contexte d'appui aux processus de normalisation et de réglementations techniques

Ce projet a contribué à l'organisation de standardisation CENELEC (Comité Européen de Normalisation Electrotechnique) comité technique TC106 pour des normes de station de base put-into-service (EN50XXX) et put-into-field (EN50YYY). Ce projet a aussi contribué au groupe de travail COST281 (www.cost281.org) qui fournit des informations aux organisations officielles comme WHO, ICNIRP, NRPB, CENELEC et la Commission Européenne.

En plus, les résultats ont été transmis à l'IBN (Institut Belge de la Normalisation).

Les résultats du projet ont été présentés au niveau national et international. Les résultats du projet sont des publications scientifiques et le support pour des organisations de standardisation. Nous avons 3 publications A1 acceptées: 2 dans IEEE Transactions [Joseph et al. (2002e)], [Joseph et al. (2003b)] et 1 dans IEE Electronics Letters [Joseph et al. (2003d)]. Ces magazines ont un grand impact. En plus, nous avons 7 articles de conférence [Joseph et al. (2001c)], [Joseph et al. (2001d)], [Olivier et al. (2001)], [Joseph et al. (2002c)], [Joseph et al. (2002d)], [Martens et al. (2002)], [Joseph et al. (2003c)] et deux articles ont été soumis [Joseph et al. (2001e)], [Joseph et al. (2003e)].

Des rapports semestriels avec des résultats intermédiaires ont été distribués et les résultats ont été présentés à une commission, avec comme membres: Buyse Dany (Agoria), Calderone Anna (Politique scientifique fédérale), Nicolas Jacques (MINECO), Niemegeers Philippe (Proximus) et Van Den Bossche Stefan (Mobistar). Agoria représente l'industrie technologique en Belgique. Par l'affiliation d'Agoria à d'autres organisations de standardisation comme l'ETSI (European Telecommunication Standardisation Institute), les résultats du projet pourront ensuite être utilisés dans un processus de standardisation. Par la présence de M. Nicolas du "Ministère des Affaires Economiques, Service de la Métrologie", les résultats du projet pourront aussi être distribués.

E. Mots-clés

Champ électromagnétique, mesure, exposition professionnelle, sonde de mesure, antenne, dipôle, GSM, UMTS, téléphonie mobile, RF, calibrage, analyseur de réseaux, analyseur de spectre, déconvolution, filtre de résolution, perturbation de la sonde, champ proche, champ lointain, chambre anéchoïque, de-embedding, Débit d'Absorption Spécifique, SAR, distance de sécurité, zone de sécurité, fantôme, facteur de sécurité.

SUMMARY

A. Context

In the industry, many sources of electromagnetic fields are present. Although in the literature a potential risk for the workers is mentioned, not much attention has been paid to this problem or a complete lack of information is present.

At the start of this project no law concerning normalisation and technical regulation was in force in Belgium and even internationally. More specific, limits for electromagnetic radiation have been proposed. However, no procedure to control these limits has been standardised. This project will contribute to the standardisation of the acquisition of electromagnetic fields in the industry. On the basis of the acquisition a technical regulation for limits of electromagnetic radiation of equipment in the industry can be developed. The developed procedures could be used to verify the limits.

B. Objectives

This project aims at the development of a measurement procedure for electromagnetic radiation in the industry. The characterisation will be used to check whether the occupational exposure does not exceed the limits. We have defined different subtasks and purposes to realise this. These purposes are here described.

In order to be able to define measurement procedures, we will first list the electromagnetic sources. Due to the large diversity of electromagnetic sources it is impossible to develop one single measurement procedure for all sources. Therefore we aim to develop a measurement procedure that can be used in the frequency range 110 MHz to 10 GHz and can be used for the most common sources in the industry namely antennas, e.g. telecommunication antennas.

We want to apply this procedure at a typical GSM base station antenna (K736863 antenna). Using this practical case, adaptations for the procedure will be proposed.

The next purpose is the determination of the parameters that will influence the measurement procedure.

To determine and measure the different quantities (electromagnetic fields, Specific Absorption Rate or SAR) the characteristics of the measurement probes have to be investigated. Suitable measurement probes have to be selected and a comparison with commercial equipment has to be performed.

Calibration of measurement probes is very important. To perform electromagnetic field measurements, these fields have to be converted into electrical quantities such as voltage and current. These quantities can be measured using voltage meters and spectrum analysers. Antenna calibration involves the determination of this conversion and the determination of the antenna factor (AF).

We want to perform accurate and correct narrow-band measurements. Therefore a study to increase the accuracy of narrow-band measurements was necessary. When EM-field measurements around a GSM and UMTS base station with the spectrum analyser are performed, the measured power will be overestimated due to overlapping contributions in the measurement frequency points. The larger the resolution bandwidth, the larger the overestimation will be. Our purpose is to be able

to immediately determine the field values at a measurement site. Therefore we need a fast and accurate deconvolution algorithm for correcting noise disturbed measurements and eliminating the influence of the resolution filter of the spectrum analyser. Furthermore, because of the presence of noise our algorithm has to be robust.

We want to characterize the influence of the measurement probe on the evaluation of the far and near field of an electromagnetic source. While measuring, the electromagnetic field will be disturbed by the measurement probes themselves. Therefore not the true, free-space field but the disturbed field will be measured. So the measurement probe itself causes disturbance that has to be characterized.

To determine the safety compliance boundaries for occupational exposure of a base station antenna, the electromagnetic fields around the base station antenna must be determined and be compared to the reference levels. Therefore it is important to be able to perform accurate electromagnetic field measurements close to the source. Both electric and magnetic field have to be determined when performing measurements in the near field of the base station. Mostly, antenna radiation measurements are performed in an anechoic chamber. However, this is expensive. We want to perform near-field measurements in an indoor open-site surrounded by absorbers to minimise interference. To obtain accurate results, residual reflections due to the non-anechoic property of the measurement site have to be eliminated with a de-embedding method. Our purpose is to develop a low-cost method delivering accurate results.

To determine the compliance boundaries of a base station not only the electromagnetic fields have to be determined but also SAR assessment is necessary. To determine the SAR a phantom (model of a human) has to be used. Therefore different phantoms will be compared. One type of phantom will be proposed to perform the measurements.

We want a good agreement between measurements and simulations (EM field and SAR). Then we will have accurate results and a practically usable model of a GSM antenna.

It will be necessary to determine the SAR in a realistic model of a human and to compare the determined SAR values with those obtained in the homogeneous phantoms. We aim then to define a safety factor dependent on the frequency and the used phantom.

It is the objective to compare the safety distances of the EM-fields with the safety distances of the localised and whole-body SAR. We investigate typical GSM base station antenna for different input powers used in Belgium.

Finally, SAR assessment is expensive and very time consuming so it would be interesting to determine the distance from which on electromagnetic field assessment will always deliver the most restrictive compliance boundaries and thus when it is not anymore necessary to determine the SAR to obtain the most restrictive safety distances.

C. Conclusions

We have listed the electromagnetic sources of RF-radiation in the industry in Belgium in [Joseph et al. (2000)]. Frequencies and input powers of the several sources are reported. The parameters that influence the measurement procedure are investigated in [Joseph et al. (2001a)].

We have developed an accurate and consistent method to determine the antenna factor [Joseph et al. (2001c)], [Joseph et al. (2001d)] and [Joseph et al. (2001e)]. By using the inverse FFT and by using antennas with totally different antenna factors the mean deviation is only 0.15 dB and the maximum deviation is only 0.49 dB for the antenna factor of a conical dipole antenna. Furthermore, this method does not need to be performed in an anechoic chamber to be accurate resulting in a low-cost method. The Austrian Research Center Seibersdorf specified the antenna factor with an uncertainty of ± 1 dB. So our result is lying within this uncertainty interval.

In [Joseph et al. (2002e)] we have developed a robust and accurate deconvolution algorithm for the determination of the maximum power of non-stationary signals located in a wide frequency band with a spectrum analyser. This algorithm fulfils the demands in paragraph B (elimination of resolution filter of the spectrum analyser, be able to determine immediately the field values at a measurement site, fast and automated and robust for noise). We have applied the method to GSM and UMTS signals and have shown that it still performs excellent in cases where the signal-to-noise ratio goes down to 3.

We have presented the characterisation of the disturbance caused by a probe measuring the electric or magnetic field in [Joseph et al. (2001c)], [Joseph et al. (2003b)], [Joseph et al. (2002c)] and [Joseph et al. (2002d)]. It can be concluded that the disturbance of the measurement probe in the far field of the transmitting antenna is negligible (below 1 %) when a probe with maximal sensitivity is used, but this is not anymore the case in the near field of both the transmitting antenna and the measurement probe. A selection of measurement probes with a disturbance required to be lower than 5 % for near- and far-field exposure measurements around a 900 MHz base station is made. It was concluded that for far- and near-field measurements different probes have to be used. For measurements in the far field of the base station, a $\lambda/2$ dipole offers the highest sensitivity and a disturbance lower than 1 %. For the near-field measurement, an optimal length of $\lambda/4$ was found (7.5 cm at 900 MHz) with a disturbance of lower than 5 % and the highest reachable sensitivity under this condition.

In [Joseph et al. (2001b)], we have developed a procedure for laboratory measurements to determine the safety distances of an EM source in the frequency range 110 MHz to 10 GHz. To determine the safety distances of a base station antenna two possible routes can be followed. The electromagnetic fields around the base station antenna can be determined and the field values can be compared to the reference levels. On the other hand, the compliance boundaries can be determined using SAR assessment and the SAR can be compared with the basic restrictions.

We have developed an accurate low-cost method [Joseph et al. (2003d)] for measurements close to a base station antenna. The compliance boundaries for different input powers have been determined. Excellent agreement between measurements and simulations for both the electric and magnetic field has been reported. The maximum and the average of the relative deviation of E^{plane} (i.e. averaging of the field in a plane) are respectively 6.8 % and 2.8 %. The maximum and the average of the relative deviation of E^{vol} (averaging of the field in a volume) are respectively 2.8 % and 2.1 %. These are all very small deviations compared to measurement uncertainties published in the literature.

We have developed in [Joseph et al. (2002b)] and [Joseph et al. (2003a)] a measurement procedure for the localised SAR in a rectangular box phantom. We

have compared SAR measurements and simulations close to a K736863 antenna and good agreement is reported. It has to be mentioned that a spheroid phantom delivers higher SAR values due to its curvature than a rectangular box phantom.

In [Joseph et al. (2003a)] and [Joseph et al. (2003c)] the safety distances for the localised SAR (10 g) and the electric field are compared. For the SAR a safety factor 3 has been taken into account at 947,5 MHz for the rectangular box phantom. From 2.3 cm ($<\lambda/10$) on the electric field averaged in a volume delivers the highest safety distances and from this distance on it is not necessary to determine the localised and whole-body SAR to obtain the most restrictive compliance boundaries.

When the maximum field value or the averaged field value in a plane is chosen, the electric field will always deliver at 10 and 20 W the most restrictive safety distances. At 10 and 20 W the maximal safety distances for the K736863 antenna are respectively 15.7 and 30.4 cm. These distances are much smaller than practically used safety measures in Belgium [GOF (2002)].

We have investigated plane wave excitation using FDTD-simulations for a homogeneous rectangular box phantom, a homogeneous prolate spheroid phantom and a realistic heterogeneous model of a man. We have presented a new safety factor [Joseph et al. (2003e)] for the determination of the SAR in a homogeneous phantom. From our results the arbitrary factor 2 of [CENELEC (2002)] is not a good choice. The safety factor is frequency and phantom dependent and e.g., for the rectangular box phantom at 947.5 MHz equal to 3 instead of 2.

D. Contribution of the project in a context of support to the processes of standardisation and technical regulations

This project has contributed to the standardisation organisation CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardization) technical committee TC106 for the base station standards put-into-service (EN50XXX) and put-into-field (EN50YYY).

This project has also contributed to the workgroup COST281 (www.cost281.org) where input for official organisations such as WHO, ICNIRP, NRPB, CENELEC and the European Commission is given.

Furthermore, the results are passed on to the BIN (Belgian Institute for Normalisation).

The results of this project are presented on national and international level. The results of this project are scientific publications and the support for standardisation organisations. We have 3 accepted A1-publications: 2 in IEEE Transactions [Joseph et al. (2002e)], [Joseph et al. (2003b)] and 1 in IEE Electronics Letters [Joseph et al. (2003d)]. These magazines have a large impact.

Furthermore we have 7 accepted conference papers [Joseph et al. (2001c)], [Joseph et al. (2001d)], [Olivier et al. (2001)], [Joseph et al. (2002c)], [Joseph et al. (2002d)], [Martens et al. (2002)], [Joseph et al. (2003c)] and two papers are submitted [Joseph et al. (2001e)], [Joseph et al. (2003e)].

Half-yearly reports were distributed and the results were presented for a commission with members: Buyse Dany (Agoria), Calderone Anna (Belgian Science Policy), Nicolas Jacques (MINECO), Niemegeers Philippe (Proximus) en Van Den Bossche Stefan (Mobistar).

Agoria represents in Belgium the technological industry. Because of their membership in other European standardisation organisations like ETSI (European Telecommunication Standardisation Institute), this project can further be introduced for standardisation. Because of the presence of Mr Nicolas of the "Ministry of

Economic Affairs, Metrological Services” the results of this project can also be distributed.

E. Keywords

Electromagnetic field, measurement, occupational exposure, measurement probe, antenna, dipole, GSM, UMTS, RF source, calibration, network analyser, spectrum analyser, resolution filter, probe disturbance, near field, far field, anechoic chamber, de-embedding, Specific Absorption Rate, SAR, safety distance, compliance boundary, phantom, safety factor.

1 INLEIDING

In de industrie zijn veel bronnen van elektromagnetische straling aanwezig. Ondanks het feit dat in de internationale literatuur reeds potentieel gevaar voor de gezondheid van arbeiders gemeld is wordt er weinig aandacht besteed aan dit probleem of is er totale onwetendheid. Op het gebied van normering en technische regelgeving was er bij aanvang van dit project niets van kracht in België en zelfs internationaal. Er zijn wel limieten (bijvoorbeeld [ICNIRP (1998)]) voor elektromagnetische straling in arbeidsomgeving gedefinieerd maar er was geen procedure ter controle van die limieten gestandaardiseerd. Dit project levert dus een bijdrage tot de standaardisatie van de acquisitie van elektromagnetische velden in de industrie.

In het project "Onderzoek naar elektromagnetische velden in de industrie: bronnen, meetprocedures en regelgeving (N NM/02/18)" was het de bedoeling een meetprocedure te ontwikkelen om deze bronnen te karakteriseren. Deze karakterisering kan uiteindelijk gebruikt worden om na te gaan of arbeiders veilig kunnen werken in de uitgestraalde elektromagnetische velden (EM velden). Maar omdat de bronnen van elektromagnetische straling in de industrie zodanig divers zijn is het onmogelijk één enkele meetprocedure voor alle bronnen te ontwikkelen. Daarom hebben we ons tot doel gesteld een meetprocedure te ontwerpen die kan gebruikt worden in het frequentiegebied 110 MHz tot 10 GHz en kan toegepast worden op de meest voorkomende bronnen in de industrie nl. antennes, b.v. antennes in de telecommunicatie-industrie.

Op zijn beurt is het doel van de meetprocedure het bepalen van de veiligheidsafstanden, dit zijn de afstanden tot waar men de elektromagnetische bron (b.v. antenne) mag benaderen voorleer de limieten overschreden worden. Deze afstanden bepalen het volume waarbuiten de blootstellingslimieten niet overschreden worden ongeacht de tijd van blootstelling. Het zal de bedoeling zijn enkel elektromagnetische veldmetingen uit te voeren en de complexe, dure en tijdrovende SAR metingen (Specific Absorption Rate) te vermijden. Er werd dan ook nagegaan of de veiligheidsmarges bekomen met behulp van elektromagnetische veldmetingen representatief zijn voor de veiligheidsmarges bekomen op basis van SAR metingen.

Concreet werden tijdens het bestek van het project volgende stappen gezet:

- Overzicht maken van de elektromagnetische bronnen in de industrie en selectie van de bronnen.
- Parameters bepalen die de meetprocedure beïnvloeden.
- Onderzoek van meetprobes nodig voor de metingen.
- Ontwikkeling van de meetprocedure.
- Meetprocedure praktisch toepassen voor arbeiders in de buurt van een GSM-antenne.
- Het vergelijken van de veldmetingen met simulaties.
- Verschillende fantomen voor de bepaling van de SAR vergelijken.
- SAR bepaling in een balkvormig fantoom.
- Voorstellen van veiligheidsfactor voor de SAR bepaling.
- Vergelijking van de veiligheidsafstanden bekomen via de SAR route en via de route van de elektromagnetische velden.

2 METHODOLOGIE

In deze sectie worden nu de verschillende stappen die nodig waren om de meetprocedure uit te werken kort beschreven. De opeenvolging van de stappen geeft de methodologie.

2.1 Overzicht van elektromagnetische bronnen in de industrie en selectie van de bronnen

Om een meetprocedure te ontwikkelen om elektromagnetische bronnen te karakteriseren wordt in de eerste stap een overzicht gemaakt van de elektromagnetische bronnen in de industrie [Joseph et al. (2000)]. Al deze bronnen komen in België voor. Hierbij hebben we ook de frequenties en typische vermogens van de elektromagnetische bronnen gegeven en hebben we in de bijlage van [Joseph et al. (2000)] een lijst van de bronnen opgenomen. De informatiebronnen die we gebruikt hebben om deze lijst samen te stellen zijn de volgende: [Adair et al. (1999)], [Causebrook (1998)], [Chadwick (1998)], [Chen et al. (1989)], [Chen et al. (1991)], [Chung and Feng (1999)], [Dahme (1998)], [Holma and Toskala (2000)], [Jokela and Puranen, (1998)], [Yost (1998)].

We hebben het enorme frequentiegebied van 1 Hz tot 300 GHz afgebakend. Normaal was het de bedoeling om een algemene procedure te maken voor alle elektromagnetische bronnen in de industrie. Uit de inventaris van de bronnen, blijkt dat deze bronnen zodanig divers zijn dat het onmogelijk is één enkele meetprocedure voor alle bronnen te ontwikkelen. Daarom hebben we onze meetprocedure gefocusseerd op één type van RF bron, nl. antennes [Joseph et al. (2001b)]. Dit zijn de meest voorkomende bronnen in de industrie b.v. antennes in de telecommunicatie-industrie.

2.2 Bepaling van parameters die de meetprocedure beïnvloeden

Vervolgens worden de parameters die de meetprocedure voor elektromagnetische velden beïnvloeden onderzocht [Joseph et al. (2001a)]. Deze stap is noodzakelijk om een goed meetsysteem te bekomen voor elektromagnetische velden in de frequentieband 1 Hz tot 300 GHz. Het meetsysteem moet correct en eenduidig meten, dit wil zeggen onafhankelijk zijn van de oriëntatie van de meetprobe, van de tijd of van omgevingsfactoren. Anderzijds moet de meetprocedure ook in de praktijk gemakkelijk te gebruiken zijn. Gebruikte informatiebronnen voor het onderzoek van de parameters zijn [CENELEC (2002)], [Pokovic (1999)] en [ICNIRP (1998)].

2.3 Onderzoek van meetprobes

Om metingen uit te voeren moeten meetprobes gebruikt worden. Afhankelijk van het type grootheid dat bepaald moet worden zullen deze probes sterk verschillen. Daarom worden de karakteristieken en de kalibratie van de meetprobes onderzocht en wordt de kalibratie van de meetprobes besproken [Joseph et al. (2001c)], [Joseph et al. (2001d)], [Joseph et al. (2001e)]. Informatiebronnen i.v.m. dit onderzoek zijn: [Chen et al. (1989)], [Jokela and Puranen, (1998)], [Tofani et al. (1995)] en [Pokovic (1999)].

Om een optimale keuze van de meetprobe te kunnen doen wordt een vergelijking van commercieel verkrijgbare apparatuur gemaakt. Ook wordt een vergelijking tussen een smalband en een breedband meetsysteem gemaakt (figuur 1).



(a) (b)
Figuur 1: (a) Smalbandig meetsysteem en (b) breedbandprobe.

Voor de standaardisatie van een meetprocedure is de optimalisatie van de nauwkeurigheid zeer belangrijk. Hierom werd een studie [Joseph et al. (2002e)] uitgevoerd om de nauwkeurigheid van de smalbandmetingen te verhogen. Wanneer metingen met een spectrumanalyser uitgevoerd worden krijgen we een vertekend beeld van het opgemeten signaal door de invloed van de resolutiefilter van de spectrumanalyser. Hoe groter de resolutiebandbreedte van deze filter, hoe groter de overschatting van het gemeten vermogen zal zijn. Het doel van de studie is om de correcte veldwaarden direct op de meetplaats zelf te bepalen. We hebben in [Joseph et al. (2002e)] gebruik gemaakt van volgende informatiebronnen: [Dhaene et al. (1994)], [Hansen et al. (2000)], [Yagüe et al. (1998)].

2.4 Ontwikkeling van de meetprocedure

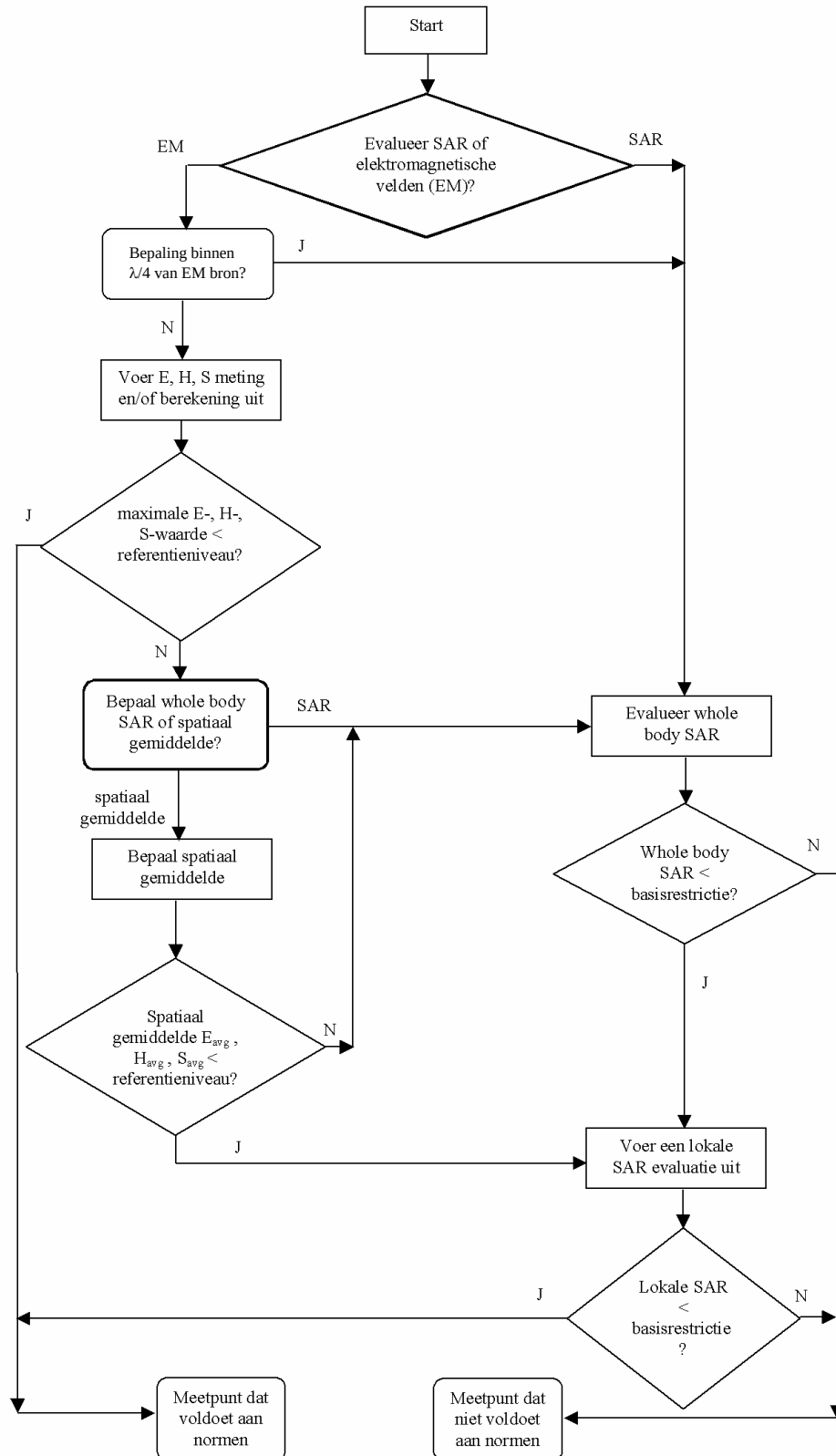
Alhoewel we in paragraaf 2.1 de bronnen beperkt hebben tot antennes is de meetprocedure algemeen toepasbaar voor EM bronnen in de industrie.

Het doel van de meetprocedure is dus het bepalen van de veiligheidsafstanden, dit zijn de afstanden tot waar men de elektromagnetische bron mag benaderen voorleer de normen (bijvoorbeeld [ICNIRP (1998)]) overschreden worden. Figuur 2 beschrijft de mogelijke routes om de veiligheidsafstanden te bepalen. Elke volledig gevolgde route verzekert dat een bepaald meetpunt in de buurt van de EM bron voldoet aan de basisrestricties ofwel direct ofwel indirect door middel van de referentieniveaus van de velden. De kaders die in het vetjes gezet zijn duiden aan dat voor twee gelijkwaardige paden kan gekozen worden. In figuur 2 stelt S [W/m^2] de vermogendichtheid voor en is gedefinieerd als: $S = E \cdot H$ (E = elektrisch veld, H = magnetisch veld). Belangrijk is op te merken dat er dus twee routes kunnen gevolgd worden om de veiligheidsmarges te bepalen: de **route van de elektromagnetische velden** en de **route van de Specific Absorption Rate (SAR)**. Beiden worden in [Joseph et al. (2001b)] onderzocht.

Om een meetprocedure [Joseph et al. (2001b)] te ontwerpen voor de veiligheidsafstanden in de buurt van elektromagnetische bronnen in de industrie zouden dus SAR metingen noodzakelijk zijn. Er werd nagegaan of de veiligheidsmarges bekomen met behulp van elektromagnetische veldmetingen

representatief zijn voor de veiligheidsmarges bekomen op basis van SAR metingen. Omdat SAR metingen tijdrovend en duur zijn en moeilijk uit te voeren on-site in een bedrijf zou het interessant zijn enkel elektromagnetische veldmetingen te kunnen uitvoeren en deze als alternatief voor de SAR metingen te gebruiken.

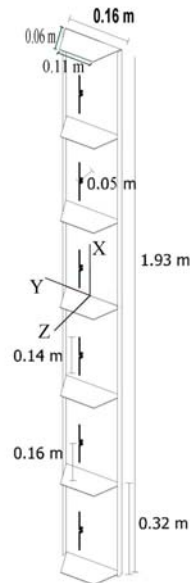
We hebben in eerste instantie een meetprocedure ontwikkeld voor metingen in labo-omstandigheden. We doen dit omdat dan de resultaten van de elektromagnetische veldmetingen kunnen vergeleken worden met metingen van de basisrestricties (Specific Absorption Rate, SAR), die enkel in labo's kunnen uitgevoerd worden. Omdat de omgeving bij labo-omstandigheden goed gekend is kunnen er ook simulaties uitgevoerd worden en kan er een grondige vergelijking gemaakt worden tussen de veiligheidsafstanden van de elektromagnetische velden en van de SAR. In een later stadium kan de meetprocedure uitgebreid worden naar "in-the-field" metingen. Bij dit soort metingen zal er achtergrondstraling zijn ten gevolge van andere stralingsbronnen en zullen de elektromagnetische bronnen zich in specifieke omgevingen bevinden. Er zullen dus dan verschillende omgevingsfactoren meespelen. Hoe dan ook zal de rechtstreekse straling dicht bij de elektromagnetische bron dominant zijn en zal de labometing dan veel nauwkeuriger kunnen gebeuren dan de "in-the-field" meting en dus vrij goed representatief zijn. Deze meetprocedure kan gebruikt worden in het frequentiegebied 110 MHz tot 10 GHz.



Figuur 2: Meetprocedure om te bepalen of een meetpunt voldoet aan de veiligheidsnormen voor EM bronnen in de industrie.

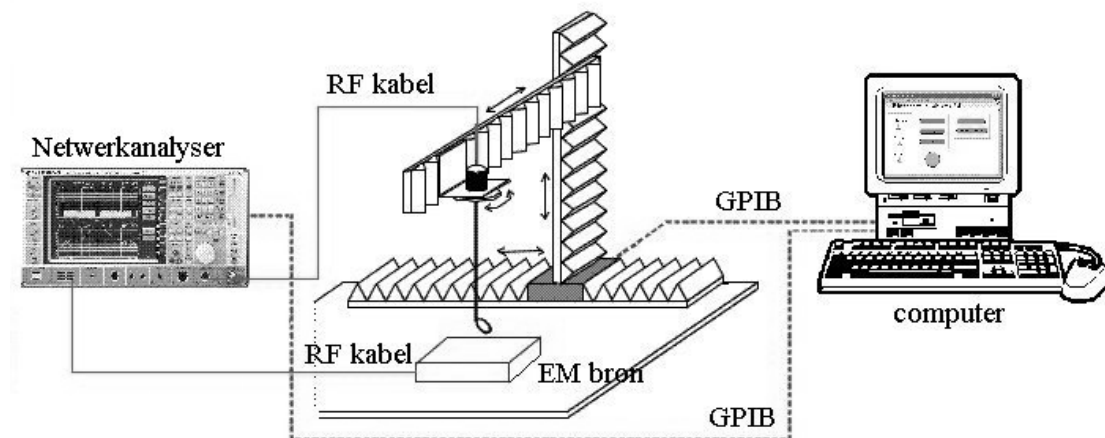
2.5 Praktisch toepassen van de ontwikkelde meetprocedure op antennes

Vervolgens wordt de meetprocedure voor arbeiders in de buurt van een GSM-antenne praktisch toegepast [Joseph et al. (2002a)]. Door deze procedure praktisch toe te passen op een typische basisstationantenne (we hebben gekozen voor de Kathrein 736863 GSM antenne) was het mogelijk om dan aanpassingen aan de procedure voor te stellen. Figuur 3 toont de antenne onder test en het gebruikte assenstelsel.



Figuur 3: Antenne onder test.

Om de meetprocedure te evalueren moest een meetopstelling ontwikkeld worden voor EM veldmetingen in het nabije veld. Figuur 4 toont een blokdiagram van de meetopstelling.



Figuur 4: Blokdiagram van het gebruikte nabije-veld meetsysteem.

2.6 Vergelijken van veldmetingen met simulaties

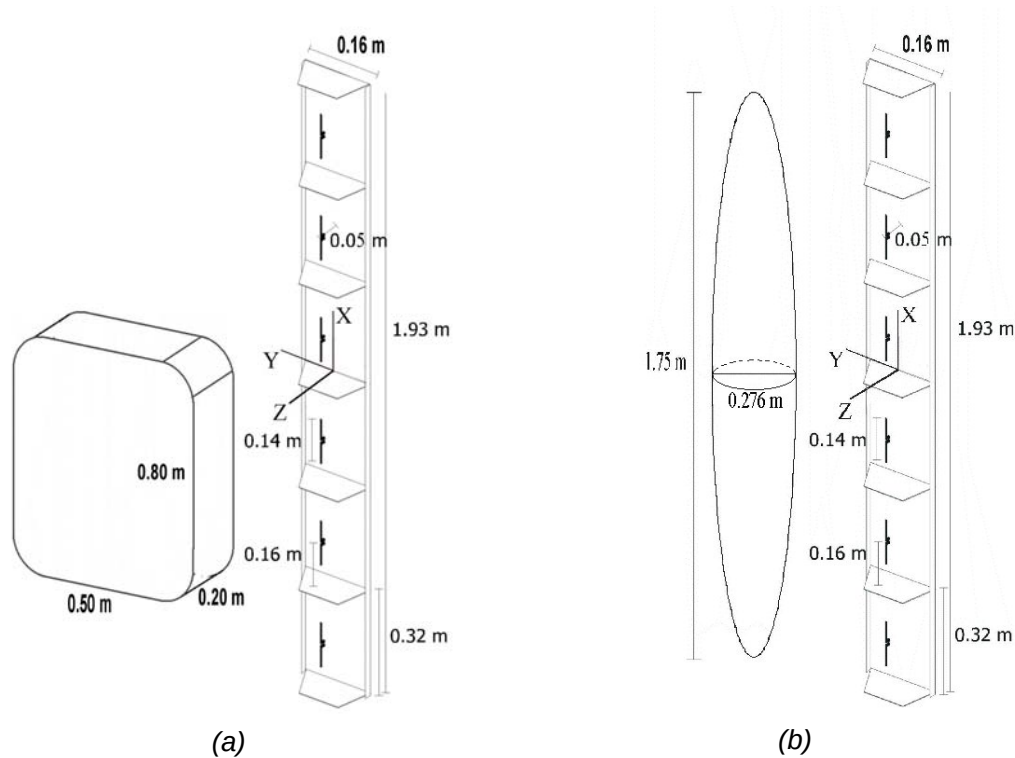
Een volgende stap, is het vergelijken van veldmetingen en FDTD-simulaties (Finite Difference Time Domain, FDTD) toegepast op een typische basisstationantenne [Joseph et al. (2002b)]. Een nieuwe techniek om de veldwaarden te bepalen zal worden besproken. Door toepassing van de nieuwe techniek die ontwikkeld werd [Joseph et al. (2003d)] kunnen reflecties geëlimineerd worden en is het niet nodig de metingen in een anechoïsche kamer uit te voeren. Het meetsysteem wordt getoond op figuur 5. We maken gebruik van een robot, een Rohde & Schwarz ZVR netwerkanalyser en de geselecteerde meetprobes.



Figuur 5: Foto van de opstelling voor het in-lab opmeten van elektromagnetische velden.

2.7 Vergelijking van verschillende fantomen voor SAR

In [Joseph et al. (2002b)] hebben we de SAR voor verschillende fantomen vergeleken. Eveneens worden de veiligheidsafstanden bekomen voor de veldwaarden vergeleken met de veiligheidsafstanden bekomen voor de lokale en totale-lichaams SAR. De fantomen die we onderzoeken zijn een balkvormig fantoom (voorgesteld door [CENELEC (2002)]) en een sferoïdaal fantoom [Durney et al. (1979)], [Durney et al. (1997)]. Figuur 6 toont de onderzochte configuraties met de dimensies van de fantomen.



Figuur 6: Gesimuleerde antenne met (a) balkvormig en (b) sferoïdaal fantoom.

2.8 Bepaling SAR in balkvormig fantoom

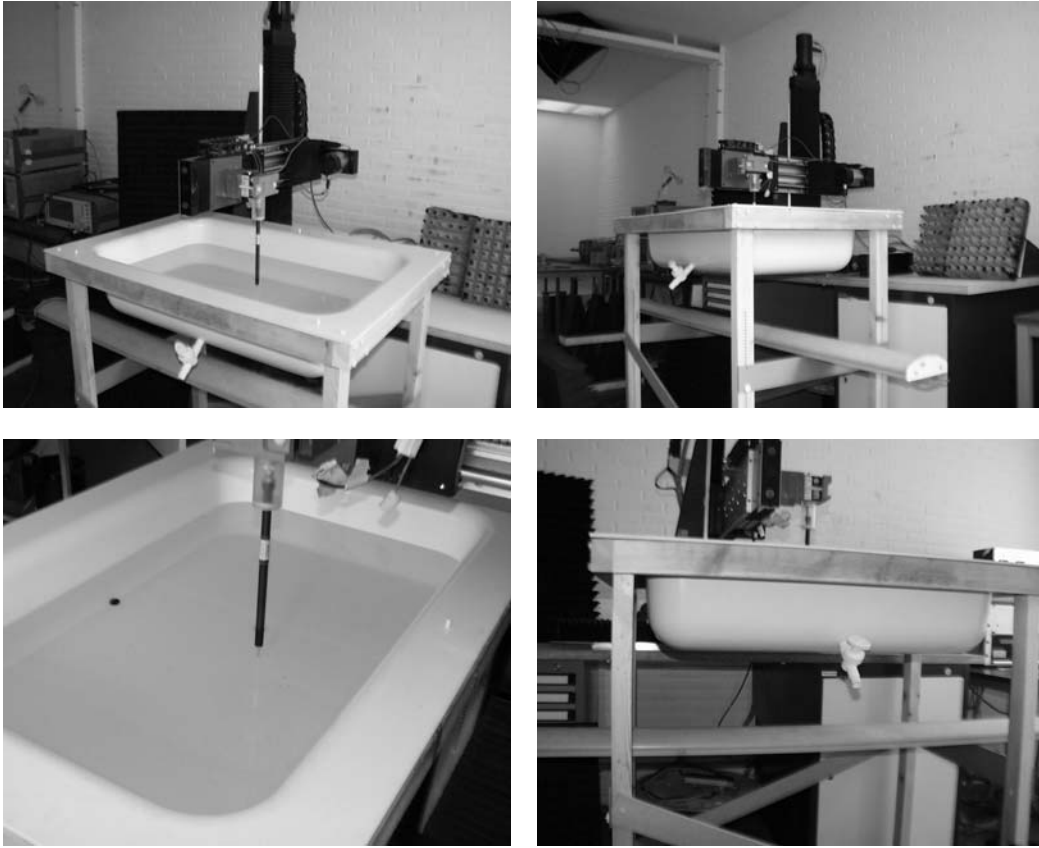
In een volgende stap bepalen we de SAR met behulp van metingen [Joseph et al. (2003a)] in een balkvormig fantoom voorgesteld door [CENELEC (2002)]. Hiervoor wordt een SAR-probe (DASY 3), een robot en een balkvormig fantoom gebruikt. Figuur 7 toont de foto's van de meetopstelling. SAR metingen en simulaties in een dergelijk balkvormig fantoom bij de K736863 antenne worden vergeleken.

2.9 Bepaling van veiligheidsfactor voor SAR bepaling

Omdat het balkvormig fantoom wegens de eenvoudige vorm en homogeniteit lagere SAR waarden zal leveren dan een realistisch mensmodel werden er FDTD-simulaties (FDTD99 met als bron vlakke golven) uitgevoerd met een dergelijk realistisch mensmodel en op basis van deze simulaties werd een veiligheidsfactor ingevoerd [Joseph et al. (2003e)]. Bij 947,5 MHz zal deze veiligheidsfactor voor het balkvormig fantoom 3 zijn. Deze veiligheidsfactor is dus frequentieafhankelijk en afhankelijk van het type fantoom en verschilt van de arbitraire factor 2 voorgesteld door [CENELEC (2002)].

2.10 Vergelijking van de veiligheidsafstanden van de SAR en van de elektromagnetische velden

Tenslotte worden de veiligheidsafstanden van de lokale SAR (10 g) en het E-veld vergeleken voor zowel metingen als simulaties. Voor de SAR is de veiligheidsfactor 3 in rekening gebracht. Bij typische ingangsvermogens worden dan de veiligheidsafstanden voor de K736863 antenne bepaald.



Figuur 7: Foto's van SAR meetopstelling.

3 RESULTATEN

In dit onderdeel geven we een overzicht van de resultaten behaald in het kader van dit project. De resultaten zijn gepubliceerd in wetenschappelijke artikels en bijdragen voor standaardisatieorganisaties. We hebben 3 aanvaarde A1-publicaties: 2 in IEEE Transactions [Joseph et al. (2002e)] en [Joseph et al. (2003b)] en 1 in IEE Electronics Letters [Joseph et al. (2003d)]. Verder zijn er 7 conferentiepresentaties aanvaard en zijn er nog 2 artikels opgestuurd naar wetenschappelijke tijdschriften. Er waren eveneens bijgedragen voor het CENELEC technisch comité TC106. Hieronder worden de resultaten grondiger besproken.

3.1 Lijst elektromagnetische bronnen in de industrie

In het eerste rapport [Joseph et al. (2000)] werd er een lijst opgesteld van elektromagnetische bronnen in de industrie. Hieronder wordt de lijst met de frequenties en typische ingangsvermogens gegeven.

Tabel I: Lijst van elektromagnetische bronnen in de industrie.

frequentieband	beschrijving	bron	beschrijving bron	frequentiebereik	specificaties toestel	typische en mogelijke blootstellingswaarden
9 kHz	VLF very low frequency	monitoren	monitoren van computers voor aansturing van machines, verwerking resultaten	ELF: 2 Hz-2 kHz VLF: 2-400 kHz	50-100 W	-
		horizontale billet heater	toestel om metaal op te warmen voor extrusie, de inductiespoel is ongeveer 70 cm groot	50 Hz	6 kA	max 8 mT, gemiddeld 10 μ T
		elektrische voeding naar een fabriek	elektrische kabels, switch materiaal, transformatoren	50-60 Hz	-	-
		inductieoven	oven met verticaal geplaatste spoel van ongeveer 1 m hoog	1 kHz	750 kW	max 5.16 mT, gemiddeld 140 μ T
		elektrisch trolley systeem	DC stroom voor tram wordt geconverteerd in een laagfrequente AC-stroom als voeding voor de motoren	0-3000 Hz	700 V DC	gemiddeld 0.67 μ T
30 kHz	LF Low Frequency	Industrial Induction Heating	opwarming door inductie, werkstuk wordt in spoel geplaatst	100 kHz	meerdere kW	typisch 1 mT
300 kHz	MF Medium Frequency	broadcast antennen MF	monopool antennen voor MF transmissie	300 kHz-3MHz	uitgestraald vermogen: 600 kW	max 120 V/m
		Industrial Induction Heating	opwarming door inductie, werkstuk wordt in spoel geplaatst	300 kHz-1 MHz 100 kHz-10 MHz	meerdere kW	0.2 - 12 A/m
3 MHz	HF High Frequency	RF Heat Sealer / Dielectric Heaters	toestel om twee of meerdere stukken plastic aan elkaar te smelten, om lijm te drogen	13.56 / 27.12 / 40.68 / 100 MHz	1-7 kW	max 1000-2700 V/m max stroom 600mA SAR (WBA) 0.12-2 W/kg
		diathermische toestellen	toestellen voor de behandeling van spieren en ligamenten	27.12 MHz	tientallen W	< 1000 V/m op 0.2 m < 500 V/m op 0.5 m
		walkie-talkie, professionele mobiele radio's (PMR)	toestellen voor mobiele communicatie	27.12 MHz	-	1000 V/m, 0.2 A/m op 5 cm afstand
	VHF Very High Frequency	broadcast antennen HF	een reeks van dipolen voor HF transmissie	3-30 MHz	uitgestraald vermogen: 600 kW	max 120 V/m
		broadcast antennen TV en radio FM	antennen in TV -en FM-masten	50-800 MHz	uitgestraald vermogen: 10- 50 kW	max 50 Wm ⁻²
		meetopstellingen voor het testen van EMC	bv. open cellen, doorslagproeven	tot 1 GHz	-	naargelang opstelling
300 MHz	UHF Ultra High Frequency	broadcast antennen TV en radio FM	antennen in TV -en FM-masten	50-800 MHz	uitgestraald vermogen: 10- 50 kW	max 50 Wm ⁻²
		diathermische toestellen	toestellen voor de behandeling van spieren en ligamenten	433 MHz	tientallen W	25 W/m ² op 50 cm 10 W/m ² op 1 m
		draadloze telefoons, mobiele telefoontoestellen	toestel voor mobiele communicatie met ontvangstantenne	900 MHz, 1800 MHz	maximum uitgestraald vermogen 0.25 W (GSM900), 0.125 W (GSM1800)	max (900 MHz): 300 V/m
		antennen voor mobiele communicatie	basisstations voor mobiele communicatie: GSM- of DCS1800-band	900-1800-2000 MHz	max input vermogen 100 W	typisch 0.5 V/m, 1.2 mA/m
		diathermische toestellen	toestellen voor de behandeling van spieren en ligamenten	2.45 GHz	200 W	25 W/m ² op 50 cm 10 W/m ² op 1 m
		microgolfoven	toestellen om voedsel op te warmen	2.45 GHz	600 - 1000 W	0.62 W/m ² op 5 cm 0.06 W/m ² < 0.3 m
		Anti-diefstal systemen	detectie van diefstal door middel van elektromagnetische velden	0.9 - 10 GHz	-	2 mWm ⁻²
3 GHz	SHF Super High Frequency	radarsystemen voor luchtverkeercontrole	gebruik als detectie en volgsystemen in lucht en zee	1-10 GHz	verschillende kW	0.5-10 Wm ⁻²
		tracking radar	gebruik als detectie en volgsystemen in lucht en zee	4-6 GHz	verschillende kW	4000 V/m 42000 Wm ⁻² in de richting van de hoofdbundel

3.2 Kalibratie van meetprobes

In deze sectie worden de resultaten van het onderzoek naar de kalibratie van de meetprobes besproken. De kalibratie heeft een grote impact op de nauwkeurigheid van de metingen wat zeer belangrijk is voor de standaardisatie van de meetprocedure. Om elektromagnetische velden te meten, moet men deze velden omzetten naar elektrische grootheden zoals spanning en stroom, die dan m.b.v. algemeen gebruikte toestellen (zoals spanningsmeters en spectrumanalysatoren) kunnen gemeten worden. Kalibratie omvat het bepalen van deze omzetting. Daarom is er in het kader van dit project onderzoek over kalibratie van meetprobes uitgevoerd. Publicaties [Joseph et al. (2001c)], [Joseph et al. (2001d)] en [Joseph et al. (2001e)] tonen de wetenschappelijke relevantie van onze studie over dit onderwerp aan. We geven hieronder een samenvatting van de ontwikkelde kalibratieprocedure.

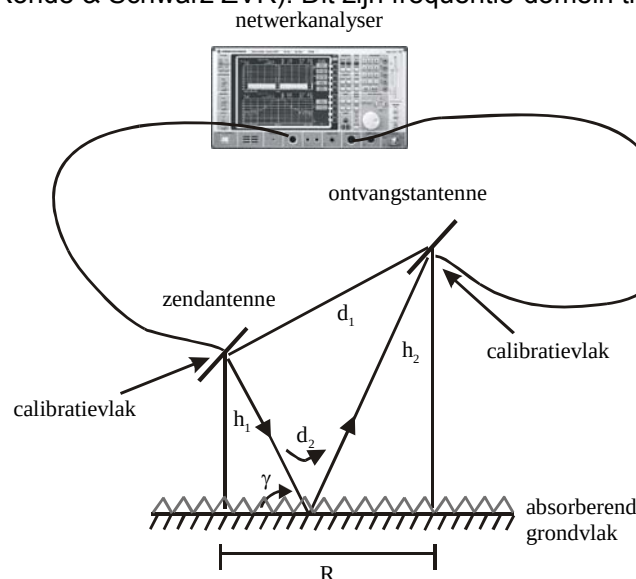
3.2.1 Methode

Antennekalibratie heeft betrekking op het bepalen van de antennefactor AF [$\text{dB}(\text{m}^{-1})$]. De antennefactor wordt gedefinieerd als de verhouding van het invallend elektromagnetisch veld waarin de antenne zich bevindt, tot de spanning die door dit veld wordt veroorzaakt en die aan de uitgang van de antenne gemeten wordt:

$$AF = 20 \cdot \log\left(\frac{E}{V}\right) [\text{dB}(\text{m}^{-1})] \quad (1)$$

E is het veld invallend op de antenne die moet gekalibreerd worden en V is de spanning die gemeten wordt door de te kalibreren antenne. Hoe lager de antennefactor van een meetantenne is, hoe lager de veldwaarden die men kan meten en dus hoe sensitiever het totale meetsysteem wordt. Er wordt voor gezorgd dat voor de bepaling van de antennefactor aan de verre-veldvoorwaarde [Joseph et al. (2001a)] voldaan is.

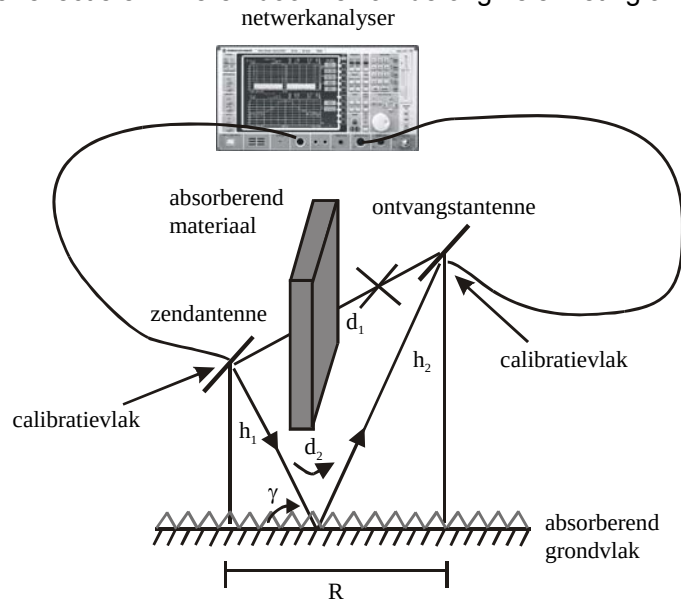
De methode die we ontwikkeld hebben is een 3-antenne methode gebaseerd op [Smith (1982a)] en [Smith et al. (1982b)]. Bij een dergelijke methode worden drie antennes in één maal gekalibreerd. De drie antennefactoren worden afgeleid uit drie vergelijkingen bekomen door drie transmissiemetingen uit te voeren. Bij dergelijke transmissiemetingen worden de te kalibreren antennes gebruikt als zend-ontvangst paren. De meetopstelling voor een transmissiemeting wordt getoond in figuur 8. De metingen gebeurden met een netwerkanalyser (Rohde & Schwarz ZVR). Dit zijn frequentie-domein transmissiemetingen.



Figuur 8: Meetopstelling.

Om de antennefactor nauwkeurig te bepalen worden metingen meestal uitgevoerd in een anechoïsche kamer. Een anechoïsche kamer is een kamer waarvan de wanden bekleed zijn met absorberend materiaal dat carbon bevat. Dit materiaal minimaliseert de reflecties op de muren van de kamer. Het bouwen van een anechoïsche kamer is een zeer dure aangelegenheid. Daarom was het nodig een goedkope kalibratiemethode te ontwikkelen. Bij onze methode [Joseph et al. (2001e)] wordt de kalibratie uitgevoerd in een binnenshuis open-site waar we beperkt absorberend materiaal rond de meetopstelling aangebracht hebben. Dus een dure anechoïsche kamer is niet nodig. Om rekening te houden met de niet-anechoïsche eigenschap van onze meetruimte moeten de residuele reflecties geëlimineerd worden. De vergelijkingen waarmee we de antennefactoren bepalen houden immers enkel rekening met de rechtstreekse straal en niet met gereflecteerde stralen. Daarom hebben we twee de-embedding methodes ontwikkeld.

In de eerste methode wordt een bijkomende meting uitgevoerd met een absorberend materiaal tussen beide antennes. Figuur 9 toont deze de-embedding methode. In dit geval wordt enkel de reflectie gemeten en wordt de rechtstreekse straal geblokkeerd. Nadien kunnen we dan de reflectie elimineren door ze van de originele meting af te trekken.



Figuur 9: De-embedding methode door een absorberend materiaal tussen beide antennes te plaatsen.

In de tweede methode gebruiken we de inverse “Fast Fourier Transformatie (FFT)” om tijdsdomeinsignalen te bekomen. De reflecties zullen later aankomen dan de rechtstreekse straal omdat de gereflecteerde stralen een langere weg moeten afleggen dan de rechtstreekse straal. We kunnen dan de reflecties elimineren door ze weg te filteren. Tenslotte nemen we de FFT om opnieuw transmissieresultaten in het frequentiedomein te bekomen.

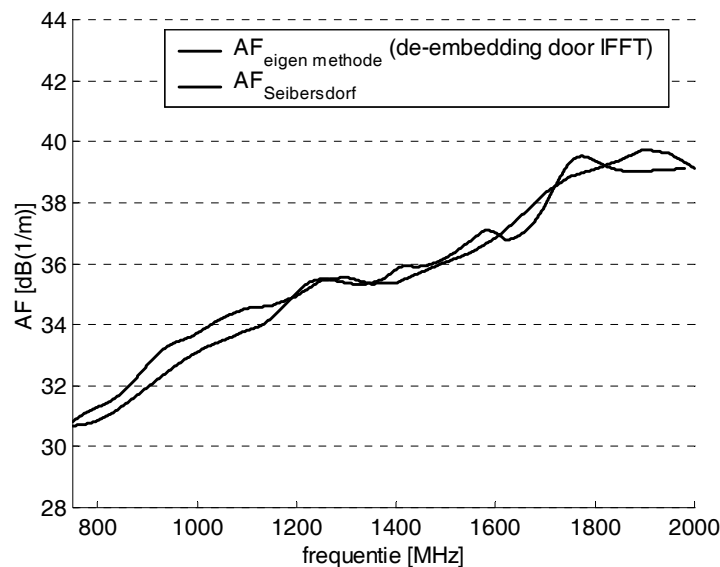
3.2.2 Resultaten

De resultaten verkregen met onze methode zijn vergelijkbaar met deze bekomen in een anechoïsche kamer. Om de nauwkeurigheid te controleren bepalen we de antennefactor van een conische dipoolantenne en vergelijken we onze resultaten met deze van het Oostenrijkse Onderzoekscentrum in Seibersdorf. Figuur 10 toont de conische dipoolantenne type PCD 8250.



Figuur 10: Conische dipoolantenne PCD 8250 van het Oostenrijkse Onderzoekscentrum in Seibersdorf.

De antennefactor is bepaald in het frequentiegebied 600 – 2000 MHz. Figuur 11 toont het resultaat waarbij de-embedding met de inverse FFT is toegepast.



Figuur 11: Vergelijking van de antennefactoren van de conische dipoolantenne respectievelijk verkregen met de klassieke methode in een anechoïsche kamer (Oostenrijkse Onderzoekscentrum in Seibersdorf) en met onze methode door gebruik te maken van de inverse FFT.

De de-embedding methode die gebruik maakt van een absorberend materiaal tussen beide antennes levert ook goede resultaten: de maximale afwijking is 1,30 dB en de gemiddelde afwijking is 0,41 dB. De methode die de inverse FFT gebruikt levert echter de beste resultaten met een maximale afwijking van slechts 0,84 dB (figuur 11). De gemiddelde afwijking bedraagt slechts 0,39 dB. Het Oostenrijkse Onderzoekscentrum Seibersdorf specificeerde de antennefactor met een onzekerheid van ± 1 dB. Bijgevolg liggen al de frequentiepunten binnen dit onzekerheidsinterval wanneer de inverse FFT wordt gebruikt. Wanneer antennes met een totaal verschillende antennefactor worden gebruikt bekomen we een maximale afwijking van slechts 0,49 dB en een gemiddelde afwijking van slechts

0,15 dB voor de conische dipoolantenne. Dit toont aan dat onze methode consequent en nauwkeurig is.

3.3 Verhoging van de nauwkeurigheid van smalbandmetingen door eliminatie van de resolutiefilter van de spectrumanalyser

In het kader van dit project werd een studie uitgevoerd om de nauwkeurigheid van de smalbandmetingen met een spectrumanalyser te verhogen [Joseph et al. (2002e)]. Wanneer metingen met een spectrumanalyser uitgevoerd worden krijgen we een vertekend beeld van het opgemeten signaal door de invloed van de resolutiefilter van de spectrumanalyser. Hoe groter de resolutiebandbreedte van deze filter, des te groter de overschatting van het gemeten vermogen zal zijn. Het doel van de methode beschreven in [Joseph et al. (2002e)] is om de correcte veldwaarden direct op de meetplaats zelf te bepalen. Dus moet de overlap door de resolutiefilter geëlimineerd worden en daarvoor is een snel en geautomatiseerd deconvolutie-algoritme noodzakelijk. Bovendien moet het algoritme robuust zijn door de aanwezigheid van ruis.

Het algoritme dat we ontwikkeld hebben in [Joseph et al. (2002e)] voldoet aan de bovenstaande eisen door gebruik te maken van een vensterfunctie (windowing) en filtering. Door een bijkomende convolutie met een blokgolf wordt de aanwezige ruis gereduceerd. Het is zelfs toepasbaar voor signaal tot ruis verhoudingen $SNR = 3$. Omdat dit een zeer technische materie (signaaltheorie) is bespreken we de methode hier niet meer in detail. Verdere uitleg kan gelezen worden in [Joseph et al. (2002e)] dat de wetenschappelijke relevantie van dit onderzoek aantoont.

3.4 Invloed van de meetprobe

Om na te gaan of de blootstelling ten gevolge van elektromagnetische straling voldoet aan de voorgestelde normen [ICNIRP (1998)] moeten de velden nauwkeurig opgemeten worden. Om een elektromagnetisch veld te meten zullen we een meetprobe in dat veld moeten brengen. Door de meetprobe in het veld te brengen zal dit veld verstoord worden en zal niet het oorspronkelijke veld maar het verstoorde veld gemeten worden. Dus de meetprobe zelf zorgt voor de verstoring.

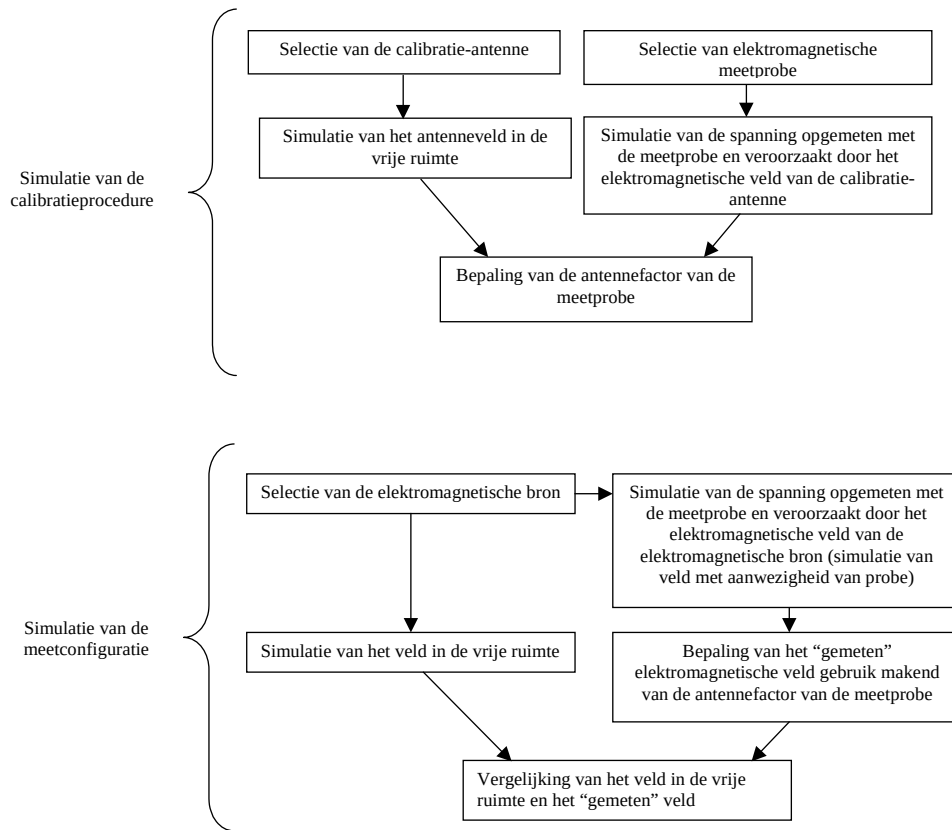
In principe zou de kalibratie die storing in rekening moeten brengen. Maar dit is enkel het geval indien de verstoring dezelfde is tijdens de kalibratie-opstelling en de meting zelf. Indien het gaat om metingen in het nabije veld zal de verstoring zeker niet dezelfde zijn als tijdens de kalibratie omdat kalibratie meestal in het verre veld gebeurt [ANSI C63.4 1998], [Smith (1982a)].

We zullen in deze paragraaf ook aantonen dat indien een maximale verstoring van bv. 5 % gewenst is, een geschikte meetprobe met maximale sensitiviteit kan gekozen worden.

Omdat arbeiders zich meestal in het nabije veld van een EM bron bevinden werd in het kader van dit project een studie over de invloed van de meetprobe zelf op de metingen uitgevoerd. Voor de details verwijzen we naar publicaties over dit onderwerp [Joseph et al. (2001c)], [Joseph et al. (2003b)], [Joseph et al. (2002c)] en [Joseph et al. (2002d)].

3.4.1 Methode om de invloed van de meetprobe te karakteriseren

De karakterisering werd uitgevoerd met behulp van een numeriek elektromagnetisch programma (NEC-Win-Pro[®]) dat de Momentenmethode gebruikt. Figuur 12 toont de "flow graph" van de gevolgde procedure.



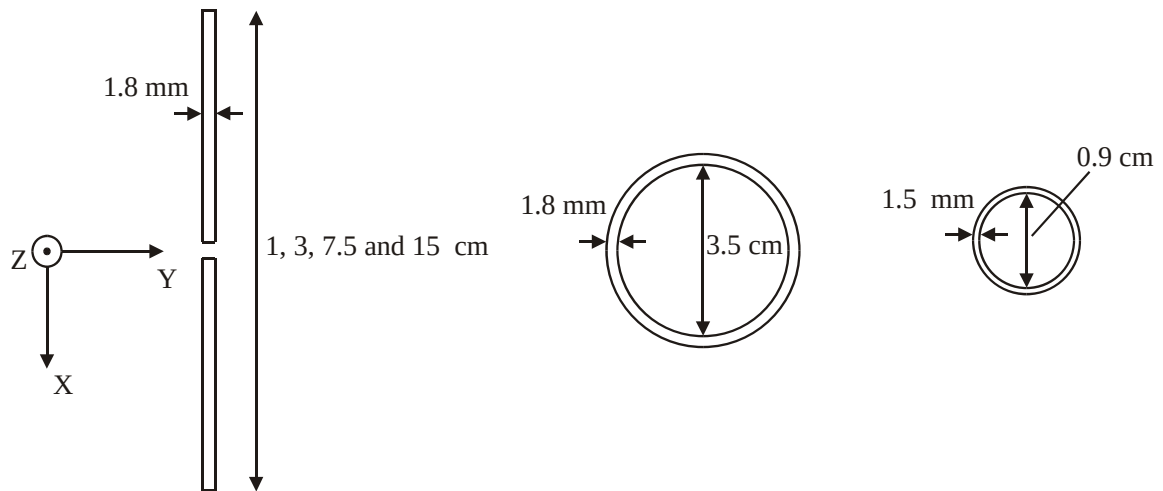
Figuur 12: "Flow graph" van de gevolgde procedure.

Eerst wordt de kalibratieprocedure gesimuleerd. Er wordt voor gezorgd dat de kalibratie in het verre veld gebeurt. Deze simulatie gebeurt in twee stappen. In de eerste stap wordt het veld in de vrije ruimte E^i van een kalibratie-antenne (bv. een dipool) gesimuleerd. In de tweede stap wordt de configuratie met twee antennes – kalibratie-antenne en meetprobe – gesimuleerd. Door de meetprobe af te sluiten op een $50\ \Omega$ weerstand kan de opgemeten spanning V^{meas} bepaald worden. Tenslotte wordt de antennefactor bepaald als de verhouding van E^i en V^{meas} .

Vervolgens wordt de meetconfiguratie gesimuleerd. De drie orthogonale componenten van het elektrisch veld worden "gemeten". De relatieve verstoring $\mathfrak{I}$ [%] van de meetprobe wordt gedefinieerd als de relatieve afwijking van het gemeten veld en het "echte" of onverstoorde veld:

$$\mathfrak{I} = \left[\frac{X^{\text{echt}} - X_{\text{tot}}^{\text{meet}}}{X^{\text{echt}}} \right] \cdot 100 \text{ met } X = E \text{ of } H \quad (2)$$

De probes die gebruikt worden voor dit onderzoek worden in figuur 13 getoond.



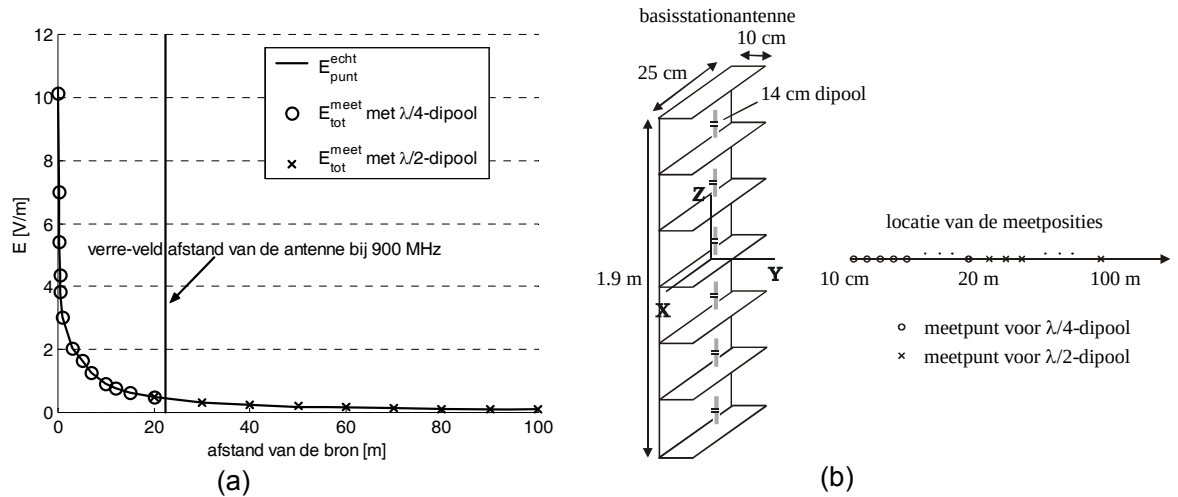
Figuur 13: Dimensies van de onderzochte meetprobes.

3.4.2 Selectie van een geschikte meetprobe

Voor de simulatie van de metingen in de vrije ruimte wordt een in de praktijk veel gebruikte 900 MHz Kathrein GSM 736863 antenne gebruikt. De verre-veldafstand bedraagt 22,4 m. De metingen worden gesimuleerd bij 900 MHz.

We wensen dat de verstoring minder dan 5 % bedraagt. Voor verre-veldmetingen zal een dipool met lengte $\lambda/2$ (15 cm, met λ de golflengte) en met straal van de dikte 1.8 mm voldoen aan deze eis. De gebruikte $\lambda/2$ -dipool is zeer sensitief met een antennefactor van 27 dB(1/m) bij 900 MHz. Hoge sensitiviteit is nodig voor verre-veldmetingen door de lage veldwaarden die er optreden.

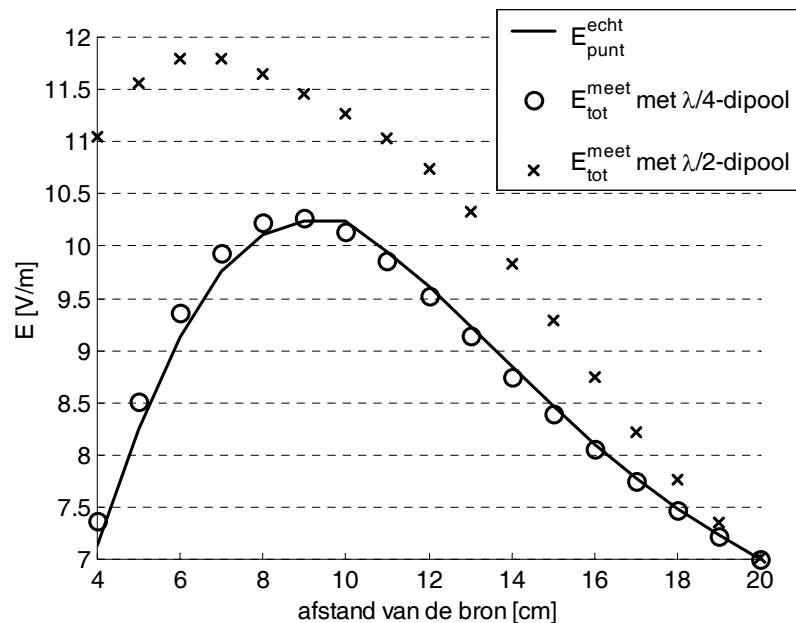
Voor nabije-veldmetingen echter zal de $\lambda/2$ -dipool door zijn grote afmetingen een verstoring hebben die hoger ligt dan 5 %. Dit kan opgelost worden door een kleinere meetprobe te gebruiken. Een kleinere meetprobe zal een betere spatiale resolutie hebben die nodig is om de snelveranderende veldwaarden in het nabije veld op te meten. Een nadeel is echter dat een kleinere probe minder sensitief zal zijn (de antennefactor ligt hoger). Om een verstoring van minder dan 5 % en maximale sensitiviteit te bekomen werd een ontwerp van de dimensie van de meetprobe gemaakt door simulaties uit te voeren. Dit resulteerde in een meetprobe met lengte 7,5 cm, wat overeenkomt met $\lambda/4$ bij 900 MHz. De dikte is dezelfde als van de $\lambda/2$ -dipool. De antennefactor bedraagt nu 44 dB(1/m) bij 900 MHz. Dit is hoger dan de antennefactor van de $\lambda/2$ -dipool maar laag genoeg om de hogere veldwaarden in het nabije veld te kunnen meten. De resultaten voor simulaties van 10 cm tot 100 m van de antenne zijn uitstekend: de verstoring ligt onder 1 %. De maximale verstoring voor de $\lambda/4$ -dipool (gebruikt voor nabije-veldmetingen) en de $\lambda/2$ -dipool (gebruikt voor verre-veldmetingen) is respectievelijk 0,68 % en 0,54 %. Figuur 14 toont de resultaten.



Figuur 14: (a) Het “echte” of onverstoord elektrische veld van de GSM-antenne bij 900 MHz versus het elektrische veld gemeten met de $\lambda/4$ -dipool en de $\lambda/2$ -dipool als functie van de afstand en (b) de antenne en de locatie van de meetpunten.

Voor beroepsblootstelling is het nodig metingen dicht bij de antenne uit te voeren. Daarom werden er simulaties van metingen van het elektromagnetisch veld met behulp van beide dipolen uitgevoerd van 4 cm tot 20 cm in stappen van 1 cm. Figuur 15 toont het gemeten en het echte elektrische veld. De verstoring van de $\lambda/4$ -dipool ligt onder 5 % (maximaal 3,3 % bij 4 cm) zoals gewenst was, terwijl de verstoring van de $\lambda/2$ -dipool meer dan 40 % bedraagt.

Deze procedure laat toe probes te selecteren met minimale verstoring en maximale sensitiviteit.



Figuur 15: Het echte elektrische veld versus het veld gemeten met de $\lambda/4$ - en $\lambda/2$ -dipool van 4 tot 20 cm van de GSM-antenne.

3.5 Ontwikkeling van de meetprocedure

In deze paragraaf wordt een algemene procedure voor een labo-omgeving voorgesteld om de veiligheidsafstanden van een EM bron in arbeidsomstandigheden te bepalen in het frequentiegebied 10 MHz tot 10 GHz. Figuur 2 in paragraaf 2 beschrijft de mogelijke methodes om de veiligheidsafstanden te bepalen in het frequentiegebied 10 MHz tot 10 GHz. Elke volledig gevolgde route verzekert dat een bepaald meetpunt in de buurt van de EM bron voldoet aan de basisrestricties ofwel direct ofwel indirect door middel van de referentieniveaus van de velden. Er kunnen dus twee routes gevolgd worden om de veiligheidsmarges te bepalen: de route van de elektromagnetische velden en de route van de Specific Absorption Rate (SAR). Indien men de SAR bepaalt moeten zowel de basisrestricties voor lokale SAR als totale-lichaams SAR in rekening gebracht worden.

In [Joseph et al. (2001b)] worden de procedures om deze grootheden te bepalen gedetailleerd besproken. Deze procedures zijn noodzakelijk om een praktisch bruikbare meetprocedure voor arbeiders in de buurt van een EM bron te bekomen.

3.5.1 Elektromagnetische velden

Tabel II toont de referentieniveaus voor beroepsblootstelling. In het nabije veld zullen zowel het elektrisch veld als het magnetisch veld moeten bepaald worden.

Tabel II: Referentieniveaus voor beroepsblootstelling voor frequenties van 10 MHz tot 300 GHz (rms waarden).

frequentie	E-veld [V/m]	H-veld [A/m]	B-veld [μ T]	Equivalente vlakke golf vermogensdichtheid S_{eq} [W/m ²]
10 – 400 MHz	61	0,16	0,2	10
400 – 2000 MHz	$3f^{1/2}$	$0,008f^{1/2}$	$0,01f^{1/2}$	$f/40$
2 – 300 GHz	137	0,36	0,45	50

opmerkingen

- f is de frequentie zoals aangegeven in de frequentiekolom
- Voor frequenties tussen 100 kHz en 10 GHz moeten S_{eq} , E^2 , H^2 en B^2 uitgemiddeld worden over een periode van 6 minuten.

Hieronder worden de verschillende stappen gegeven in de procedure voor de EM veldmetingen. Voor de methode zelf (zie figuur 2) en een gedetailleerde uitleg van de verschillende stappen in de procedure verwijzen we naar [Joseph et al. (2001b)].

- Plaats de EM bron in de meetopstelling (zie figuur 4)
- Stel de EM bron zodanig af dat de metingen bij een geschikt uitgangsvermogen gebeuren. Hiermee bedoelen we dat de metingen ofwel bij het maximaal vermogen gebeuren ofwel kan men de metingen bij een gekend uitgangsvermogen uitvoeren en dan nadien de resultaten herschalen.
De metingen zullen gebeuren bij de gewenste frequenties en voor de verschillende werkingsmodes. Hiervoor kan gekozen worden voor “worst-case” omstandigheden en/of typische werkingsomstandigheden.
- Voer een initiële E-veld en H-veld meting uit op een referentiepositie dicht bij de antenne en bewaar de data ter controle (bv. voor vermogensdrift).
- Voer de 3D scan uit rond de EM bron volgens de vereisten beschreven in [Joseph et al. (2001b)].
- Als laatste stap, herhaal de meting in de referentiepositie. Indien de veldwaarden meer dan 5 % afwijken van de initiële meting moeten de kabels en de meetopstelling gecontroleerd worden en moet de meting opnieuw uitgevoerd worden.

3.5.2 Lokale SAR

Tabel III toont de basisrestricties voor beroepsblootstelling.

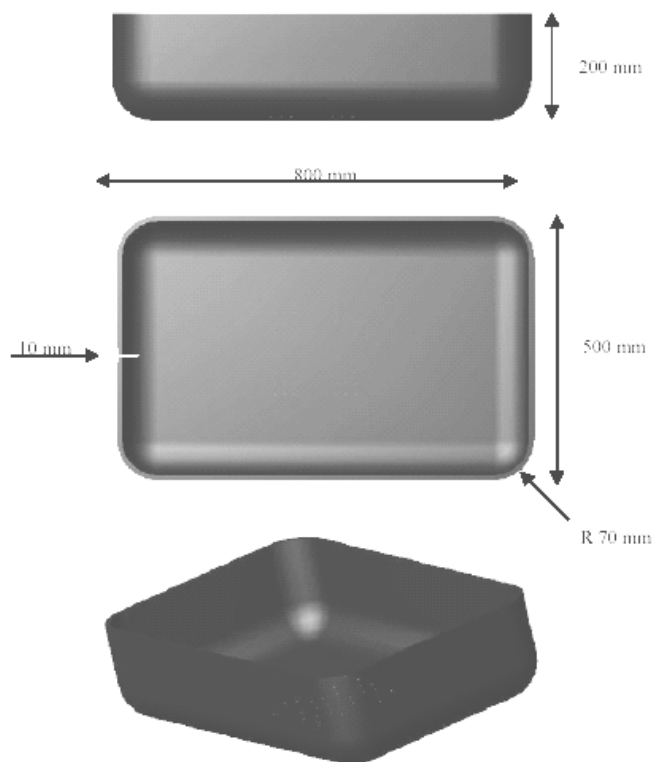
Tabel III: Basisrestricties voor beroepsblootstelling voor frequenties tot 10 GHz.

frequentie	stroombichtheid voor hoofd en romp [mA/m] (rms)	totale- lichaams SAR [W/kg]	lokale SAR (hoofd en romp) [W/kg]	lokale SAR (ledematen) [W/kg]
tot 1 Hz	40	–	–	–
1 – 4 Hz	40/f	–	–	–
4 Hz – 1 kHz	10	–	–	–
1 kHz– 100 kHz	f/100	–	–	–
100 kHz– 10 MHz	f/100	0,4	10	20
10 MHz – 10 GHz	–	0,4	10	20

opmerkingen

- f is de frequentie in Hertz
- Wegens de elektrische inhomogeniteit van het lichaam moeten de stroomdichtheden uitgemiddeld worden over een oppervlak van 1 cm² loodrecht op de stroomrichting.
- De SAR waarden moeten uitgemiddeld worden over een periode van 6 minuten
- De lokale SAR wordt uitgemiddeld over een massa van 10 g weefsel; de maximale SAR moet gebruikt worden als schatting voor de blootstelling.

Om de SAR te bepalen wordt een balkvormig fantoom voorgesteld [CENELEC (2002)]. De afmetingen van dit fantoom worden in figuur 16 getoond.



Figuur 16: Balkvormig fantoom (alle lengtes zijn binnenafmetingen).

Hieronder worden de verschillende stappen gegeven voor de procedure van de lokale SAR metingen. Voor de methode zelf (zie figuur 2) en een gedetailleerde uitleg van de verschillende stappen in de procedure verwijzen we opnieuw naar [Joseph et al. (2001b)].

1. Meet de lokale SAR op een testpunt maximaal 10 mm van het binnenoppervlak van het fantoom.
2. Verifieer dat de gemeten SAR op het meetpunt in stap 1 stabiel is na drie minuten binnen $\pm 5\%$. Dit moet gebeuren om te verzekeren dat er geen drift is door de elektronica van de EM bron.
3. Meet de SAR distributie binnen het fantoom. Doe dit door bv. binnen het fantoom in verschillende vlakken punten op regelmatige afstand van elkaar te meten. De spatiale stap zal kleiner zijn dan 20 mm. Er wordt voor gezorgd dat de afstand van het probecentrum tot het binnenoppervlak van het fantoom minder zal zijn dan 8 mm en constant is binnen $\pm 0,5$ mm.
4. Identificeer in de gemeten SAR distributie de positie van de maximale SAR. Bepaal ook de positie van lokale maxima die groter zijn dan 50 % van het gevonden maximum.
5. Meet de SAR met een spatiale stap kleiner dan 5 mm in een volume met een minimum grootte van 30 mm bij 30 mm en diepte van 25 mm. Dit volume zal gemeten worden rond elk van de lokale maxima van de SAR.
6. Gebruik procedures voor interpolatie en extrapolatie om in een volume van 1 g of 10 g de lokale SAR waarden te bepalen en de spatiale resolutie nodig voor massamiddeling te bekomen [Brishoual et al. (2001)], [Vermeeren et al. (2003)], [Bracke (2002)].
7. Vermenigvuldig de uitgemiddelde lokale SAR waarde met een factor twee¹ (een verbetering hiervoor wordt in paragraaf 3.9 voorgesteld).
8. Herhaal de SAR meting voor het initiële testpunt van stap 1. Als de resultaten meer dan $\pm 5\%$ afwijken van elkaar, dan moet de meting opnieuw uitgevoerd worden of moet de optredende drift in rekening gebracht worden voor de onzekerheidsevaluatie.

3.5.3 Totale-lichaams SAR

Totale-lichaams SAR metingen zijn niet nodig voor bronnen van elektromagnetische velden waarvan het uitgangsvermogen te laag is om de totale-lichaams SAR restricties te bereiken onder willekeurige omstandigheden.

Tabel IV geeft de niveaus van het vermogen waarvoor de restricties niet overschreden kunnen worden en waaronder dus geen totale-lichaams SAR metingen nodig zijn.

Tabel IV: Het bepalen van de whole-body SAR exclusie vermogenniveaus.

blootstellings categorie	maximum uitgestraald rms vermogen
arbeiders	Max vermogen [W] = totale-lichaams SAR limiet voor arbeiders [W/kg] · 42 [kg]

Deze totale-lichaams uitsluitingsniveaus voor het vermogen zijn gebaseerd op de volgende veronderstellingen:

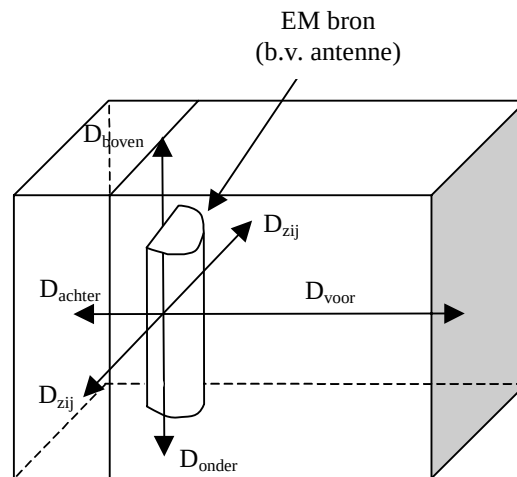
1. Al het uitgezonden vermogen wordt door het lichaam geabsorbeerd (worst-case veronderstelling)
2. De lichaamsmassa's voor een 16-jarige arbeider is 42 kg. Dit is het 3^{de} percentile lichaamsgewicht voor meisjes en vrouwen [NCHS (2001)].

3.5.4 Meetrapport

Tenslotte zal er een rapport opgemaakt worden waarbij de resultaten van bovenstaande meetprocedure [Joseph et al. (2001b)] gerapporteerd worden. Eveneens zal de gebruikte meetapparatuur, de berekeningen en de bepaling van het veiligheidsvolume waarbuiten

¹ Het gebruikte fantoom kan lokale SAR waarden leveren die lager liggen dan bij een echt lichaam. Verder onderzoek om een fantoom te bepalen dat een betere schatting levert van de lokale SAR is noodzakelijk. Ondertussen wordt een correctiefactor 2 voorgesteld door CENELEC voor de opgemeten data.

aan de normen voldaan is beschreven worden. Figuur 17 geeft een voorbeeld van een veiligheidsvolume nl. een balk waarin de antenne zich bevindt.



Figuur 17: Voorbeeld van balk als “veiligheidszone”.

Deze balk moet beschreven worden door de veiligheidsafstanden D_{voor} , D_{achter} , D_{zij} , D_{boven} en D_{onder} .

3.6 Nieuwe methode om nauwkeurig en goedkoop nabije-velddmetingen in de buurt van een antenne uit te voeren

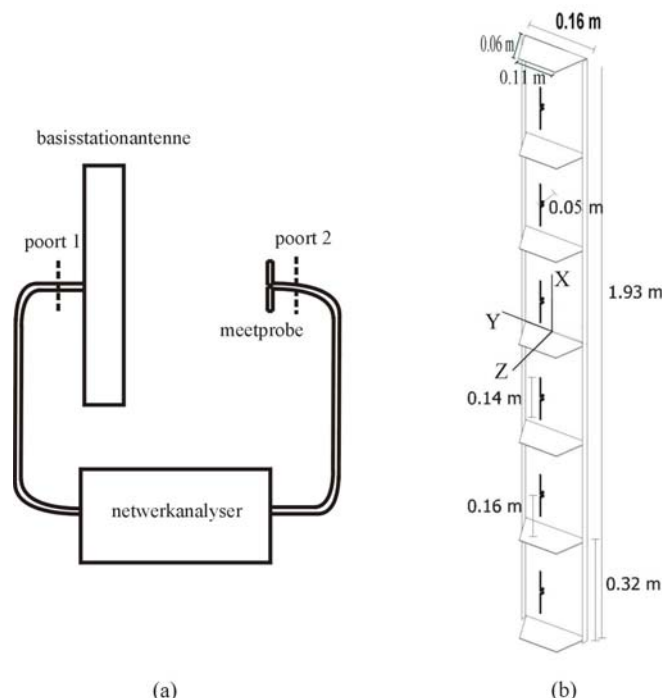
Om de veiligheidsafstanden voor arbeiders in de buurt van een basisstationantenne te bepalen, moeten de elektromagnetische velden bepaald worden en worden vergeleken met de referentiewaarden [ICNIRP (1998)]. Het is dus belangrijk om nauwkeurige veldmetingen dicht bij de bron te kunnen uitvoeren. Zowel het elektrisch als het magnetisch veld moeten bepaald worden voor metingen in het nabije veld van een antenne [ICNIRP (1998)], [CENELEC (2002)]. Meestal worden dergelijke metingen uitgevoerd in een anechoïsche kamer die zeer duur is. De metingen en meettechniek hier beschreven zijn planaire nabije veldmetingen in een binnenshuis open-site omringd met absorbers om de reflecties te minimaliseren. Om nauwkeurige resultaten te bekomen worden de residuele reflecties geëlimineerd door een de-embedding methode te gebruiken. Hierdoor hebben we een goedkope methode ontwikkeld (geen anechoïsche kamer nodig) die nauwkeurige resultaten levert.

De A1-publicatie [Joseph et al. (2003d)] toont de relevantie en praktisch nut van dit onderzoek aan.

3.6.1 Methode

We onderzoeken een Kathrein 736863 GSM basisstation antenne in de vrije ruimte bij 947,5 MHz. Dit is de frequentie waarbij de antenne maximaal uitzendt en dus het uitgestraalde vermogen maximaal is. Het referentieniveau voor beroepsblootstelling voor het elektrisch veld bedraagt **92,34 V/m** bij 947,5 MHz [ICNIRP (1998)]. Voor het magnetisch veld bedraagt het referentieniveau **0,25 A/m** bij 947,5 MHz [ICNIRP (1998)].

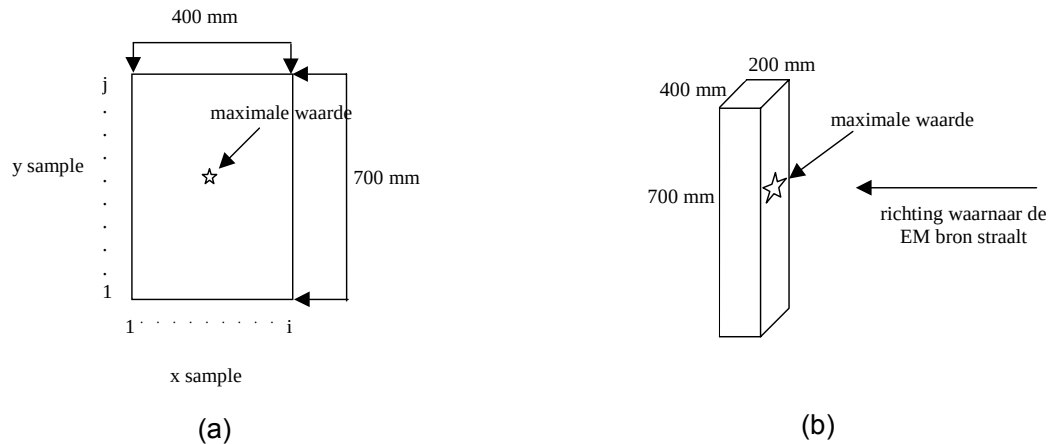
Figuren 3 en 18 tonen de afmetingen van de antenne onder test. Het referentiestelsel dat gebruikt wordt is eveneens op de figuur aangeduid. Het totale gebruikte meetvolume heeft als afmetingen $70 \times 40 \times 38 \text{ cm}^3$. We meten op een afstand van 2 tot 40 cm van de antenne. De spatiale stap bedraagt 2 cm; dit is minder dan $\lambda/10 = 3,2 \text{ cm}$ bij 947,5 MHz. De simulaties worden uitgevoerd met een FDTD-programma (Finite Difference Time Domain) in een simulatievolume van $70 \times 40 \times 40 \text{ cm}^3$. We bepalen de veiligheidsafstand tegenover de antenne, genoteerd als D_{voor} , omdat deze de strengste voorwaarden zal leveren voor deze configuratie.



Figuur 18: (a) Combinatie basisstationantenne en meetprobe als tweepoortnetwerk en (b) dimensies van K736863 antenne.

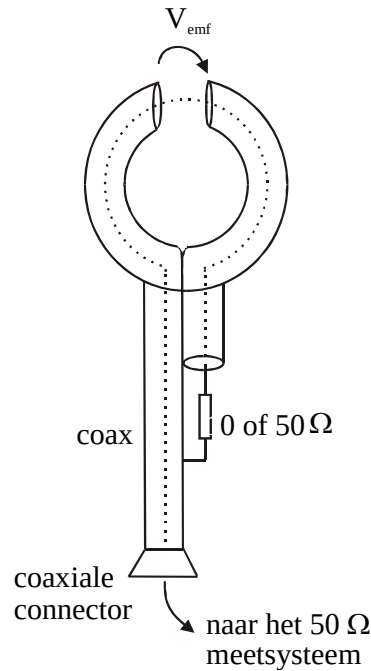
We bepalen de veiligheidsafstanden voor het elektrisch veld op 3 manieren: door de *maximale* veldwaarde in opeenvolgende vlakken te bepalen, door uit te middelen over een *vlak* en door uit te middelen over een *volume*. De maximale veldwaarde $E^{\max}$ bepalen we in opeenvolgende xy-vlakken van $70 \times 40 \text{ cm}^2$ parallel met de voorkant van de antenne. De vlakken waar we over uitmiddelen zijn xy-vlakken met afmetingen $70 \times 40 \text{ cm}^2$. We middelen uit in volumes van $70 \times 40 \times 20 \text{ cm}^3$. De afmetingen van het uitmiddelvolumen zijn zodanig gekozen dat ze de romp van een mens voorstellen [Joseph et al. (2001b)], [Joseph et al. (2002a)].

Figuur 19 toont de manier waarop de uitgemiddelde veldwaarden in een vlak (E^{vlak}) en uitgemiddelde veldwaarden in een volume (E^{vol}) bepaald worden.



Figuur 19: (a) Gebied waarover de spatiale uitmiddeling in een vlak uitgevoerd wordt met het meetpunt met de hoogste gemeten waarde in het centrum en (b) gebied waarover de spatiale uitmiddeling in een volume uitgevoerd wordt.

Om de metingen uit te voeren maken we gebruik van een Rohde & Schwarz ZVR netwerkanalyser. We beschouwen dus de combinatie EM bron en meetprobe als een tweepoort systeem (zie figuur 18 (a)). Om de procedure toe te passen worden er geschikte meetprobes ontworpen. Als meetprobe voor de elektrische veldmetingen gebruiken we een 2,2 cm lange dipool met dikte 0,5 mm zoals beschreven in [Joseph et al. (2002a)]. Figuur 20 toont de split-shield lusprobe met diameter 1,3 cm en dikte 0,5 mm ontworpen voor de magnetische-veldmetingen.



Figuur 20: Geometrie van een split-shield lusprobe met een lastweerstand van 0 of 50 Ω .

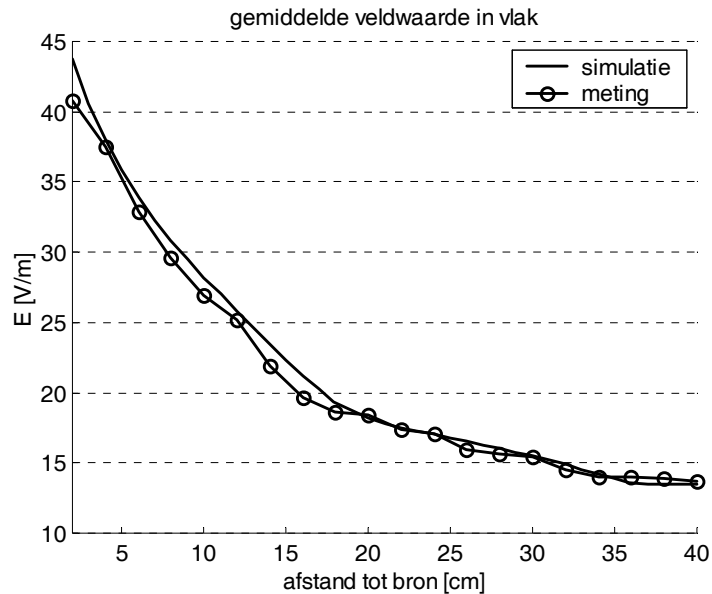
De meetomgeving is een binnenshuis open-site. Rond de meetopstelling en op de robot plaatsen we absorbers maar we voeren de metingen dus niet uit in een anechoïsche kamer. Hierdoor zullen er residuele reflecties zijn. Ook de robot zorgt voor reflecties. Al deze reflecties en verstoringen zullen de meetresultaten beïnvloeden. Omdat we de metingen wensen te vergelijken met simulaties in de vrije ruimte moeten we deze reflecties elimineren. Hiervoor werd er een nieuwe techniek ontwikkeld. Deze techniek is gebaseerd op de de-embeddingtechniek toegepast bij de kalibratiemethode (zie paragraaf 3.2) [Joseph et al. (2001c)], [Joseph et al. (2001d)], [Joseph et al. (2001e)] en [Joseph et al. (2002c)]. Figuur 18 toont de combinatie basistationantenne en meetprobe en de dimensies van de basistationantenne.

Op elk meetpunt (voor elke orthogonale component van het elektrisch veld op een meetpositie) voeren we een meting uit van 801 frequentiepunten van 300 kHz tot 4 GHz. Hiervan nemen we een inverse “Fast Fourier Transformatie (IFFT)” om tijdsdomeinsignalen te bekomen. De reflecties zullen later aankomen dan de rechtstreekse stralen omdat de gereflecteerde stralen een langere weg moeten afleggen dan de rechtstreekse stralen. We kunnen dan de reflecties elimineren door ze weg te filteren. Tenslotte nemen we de FFT om opnieuw transmissieresultaten in het frequentiedomein te bekomen.

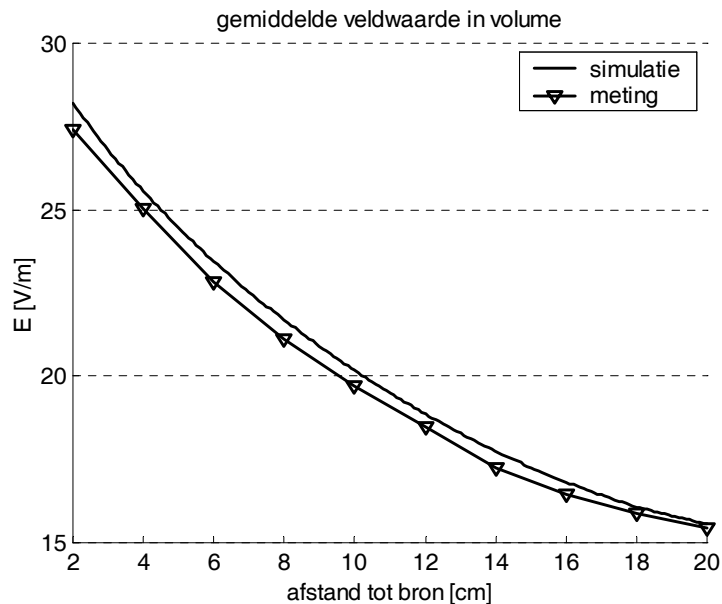
Om een voldoende hoge resolutie te bekomen is het nodig dat de metingen in een brede frequentieband moeten uitgevoerd worden. Wanneer we metingen van 300 kHz tot 4 GHz uitvoeren is de frequentieband $\Delta f = 3,9997$ GHz en bekomen we een resolutie van 0,25 ns. Het is duidelijk dat een meting van een volume uitermate tijds- en geheugenintensief is maar de meting kan wel automatisch gebeuren. Daartegenover staat dat de meetresultaten dezelfde nauwkeurigheid zullen hebben als metingen in een anechoïsche kamer. Op deze manier moet een dergelijke dure anechoïsche kamer niet gebruikt en gebouwd worden.

3.6.2 Resultaten

Figuren 21 en 22 tonen de gesimuleerde en opgemeten waarden voor E^{vlak} en E^{vol} voor 1 W ingangsvermogen. We zien dat de afwijking tussen beiden zeer klein is. De maximale en gemiddelde afwijking tussen de gesimuleerde en opgemeten waarden van E^{vlak} zijn respectievelijk 6,8 % en 2,8 %. De maximale en gemiddelde afwijking tussen de gesimuleerde en opgemeten waarden van E^{vol} zijn respectievelijk 2,8 % en 2,1 %.



Figuur 21: Vergelijking tussen metingen en simulaties van E^{vlak} .



Figuur 22: Vergelijking tussen metingen en simulaties van E^{vol} .

De veiligheidsafstanden D_{voor} voor de veldwaarden uitgemiddeld in een vlak en uitgemiddeld in een volume worden getoond in tabel V voor verschillende ingangsvermogens.

Tabel V: Vergelijking veiligheidsafstanden D_{voor} in cm voor gemeten en gesimuleerd elektrisch en magnetisch veld bij verschillende ingangsvermogens voor de Kathrein 736863 basisstationantenne.

Ingangs- vermogen [W]	D_{voor} [cm] simulaties				D_{voor} [cm] metingen			
	elektrisch		magnetisch		elektrisch		magnetisch	
	E^{vlak}	E^{vol}	H^{vlak}	H^{vol}	E^{vlak}	E^{vol}	H^{vlak}	H^{vol}
5	2,8	<0,1	3,5	<0,1	2,2	<2	2,7	<2
10	9,3	1,5	9,7	2,1	8,2	<2	9,5	2,0
15	13,7	5,7	14,0	6,3	12,8	5,0	13,9	5,8
20	16,6	9,4	17,6	9,9	15,4	8,6	17,6	9,4
30	24,8	16,0	25,0	16,5	24,4	14,8	24,9	16,2

Noot: vlak = uitmiddeling in een vlak
vol = uitmiddeling in een volume

We kunnen concluderen dat er een zeer goede overeenkomst is tussen simulaties en metingen. De relatieve afwijkingen voor D_{voor} zijn het grootst wanneer de waarde D_{voor} het kleinst is of bij de laagste ingangsvermogens.

3.7 Ontwikkeling van SAR meetprocedure en vergelijking SAR metingen en simulaties

In deze paragraaf wordt de SAR meetprocedure besproken [Joseph et al. (2003a)]. Met deze resultaten en deze van de voorgaande paragrafen is het mogelijk zowel basisgrootheden (SAR) als referentiegrootheden (elektrisch en magnetisch veld) in het frequentiegebied 110 MHz – 10 GHz te meten en te simuleren.

3.7.1 Configuratie

We plaatsen de K736863 antenne op afstanden van 1 mm tot 20 cm van het balkvormig fantoom. De ontwikkelde meetopstelling voor dergelijke metingen wordt getoond op figuur 7. We maken gebruik van een Phytron IXE α -C-T robot voor de positionering van de meetprobe. Om de omgevingsreflecties te minimaliseren plaatsen we absorbers rond de meetopstelling. De gebruikte SAR probe is de ESD3DV1 probe, geleverd en gekalibreerd voor het DASY3 systeem van Schmid & Partner Engineering AG. De meetonzekerheid van de SAR probe bedraagt 10,1 % [SARSYS (2000)]. De onzekerheid van het totale SAR-meetsysteem bedraagt ± 24 % (uitgebreide onzekerheid). We gebruiken een Rohde & Schwarz signaalgenerator (SMP 22) om de antenne aan te sturen. Kabelverliezen worden in rekening gebracht. Het fantoom dat we gebruiken is een balkvormig fantoom aanbevolen door [CENELEC (2002)]. Figuur 23 toont een foto van het balkvormig fantoom en de SAR probe.



Figuur 23: Foto van SAR meetopstelling.

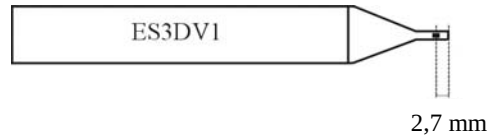
De dikte van de wand van het fantoom is 10 ± 1 mm. De diëlektrische eigenschappen van de vloeistof die menselijke weefsels simuleert worden in tabel VI getoond. De meting van de diëlektrische eigenschappen gebeurde met een HP85070A diëlektrische probe kit met een HP8753D netwerkanalyser.

Tabel VI: Diëlektrische parameters van de vloeistof die menselijke weefsels simuleert (21 °C).

frequentie [MHz]	parameter	gespecificeerd	gemeten	afwijking [%]
900	ϵ_r	41,5	$43,1 \pm 0,4$	$+ 3,7 \pm 0,9$
	σ [S/m]	0,97	$0,95 \pm 0,01$	$- 2,1 \pm 1,0$

ϵ_r = relatieve permittiviteit, σ = geleidbaarheid.

De SAR probe is geschetst in figuur 24. De afstand van de probetip tot de sensor is 2,7 mm. Hierdoor kunnen geen metingen tegen het oppervlak van het fantoom gebeuren en daarom moet er een extrapolatie van de SAR uitgevoerd worden naar het binnenoppervlak van het fantoom.

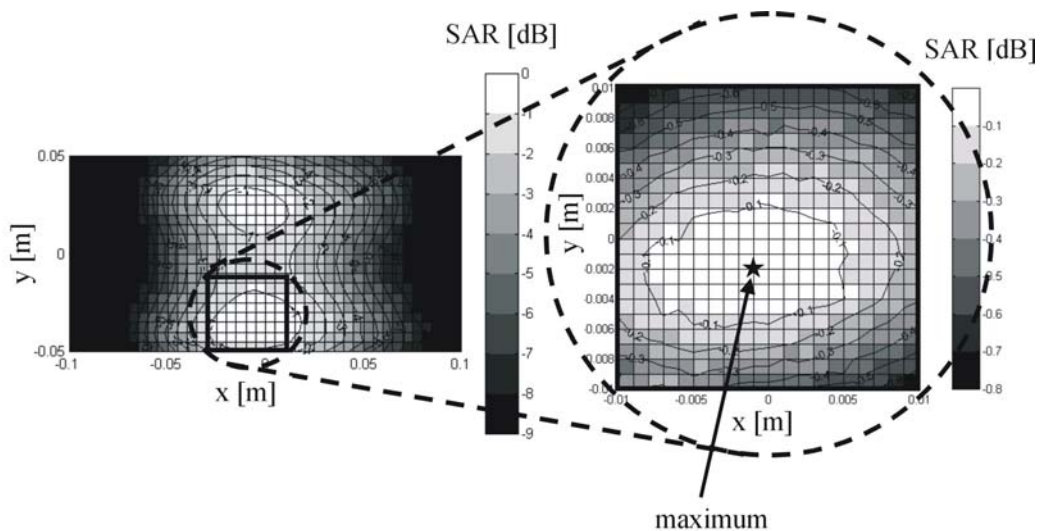


Figuur 24: Afstand sensor – probetip.

3.7.2 Methode

3.7.2.1 Locatie van maximale SAR

Met behulp van simulaties krijgen we een eerste indicatie van de locatie van de maximale SAR. Om voor elke positie van de antenne tussen 1 mm en 20 cm van het fantoom de locatie van maximale absorptie te bepalen, maken we eerst een xy-scan op 5 mm van het binnenoppervlak van het fantoom. De stapgrootte van deze eerste scan bedraagt 5 mm. Daarna zoomen we in op de zone van maximale SAR en voeren we een meting uit van $2 \times 2 \text{ cm}^2$ met een stapgrootte van 1 mm. Figuur 25 toont de bepaling van de locatie van de maximale SAR op 5 mm van het binnenoppervlak wanneer de antenne zich 1 mm van het fantoom bevindt. Vervolgens voeren we een meting uit in een gebied van $6,45 \times 6,45 \times 2,15 \text{ cm}^3$ en zoeken we de 10 g-kubus van maximale uitgemiddelde SAR.

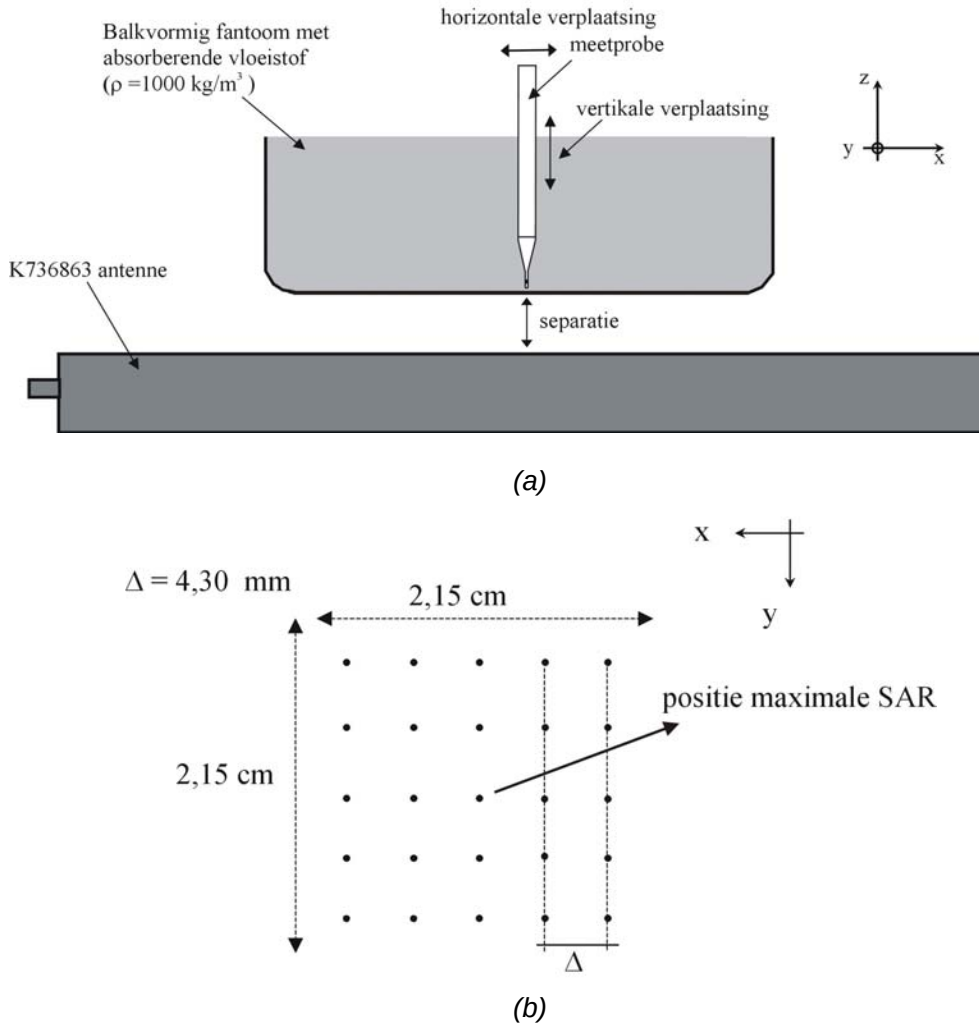


Figuur 25: SAR-distributie in het xy-vlak (op 5 mm van binnenoppervlak fantoom) en zoom-in ter bepaling van de locatie van de maximale SAR wanneer het fantoom op 1 mm van de antenne geplaatst is.

3.7.2.2 Uitmiddeling in 10 g en extrapolatie

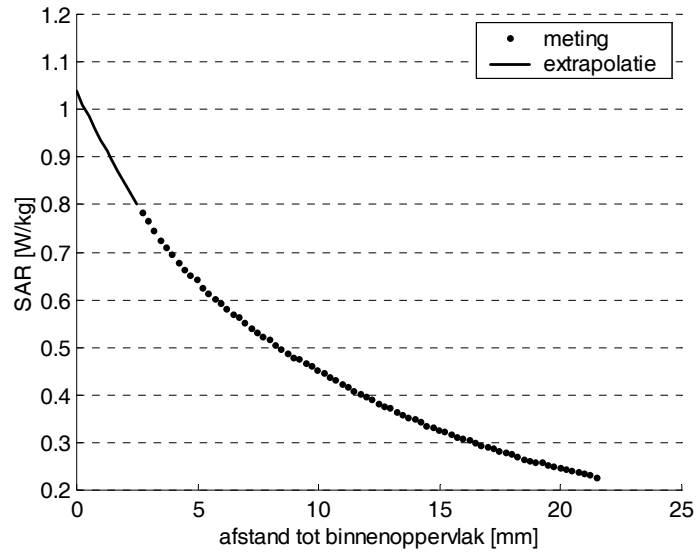
We voeren een uitmiddeling uit van de SAR over een massa van 10 g zoals aanbevolen in de ICNIRP-richtlijnen [ICNIRP (1998)]. Een 10 g-kubus van de vloeistof heeft als zijde 2,15 cm. We meten in een volume van $6,45 \times 6,45 \times 2,15 \text{ cm}^3$ met de maximale piek SAR centraal in het xy-vlak. In dit gebied bepalen we vervolgens de ligging van de kubus die de maximale 10 g uitgemiddelde lokale SAR levert en daaruit ook de maximale SAR uitgemiddeld over 10 g. In het xy-vlak is de

spatiëring tussen twee punten 4,30 mm. In de z-richting bedraagt de afstand tussen de opgemeten punten 0,25 mm. Deze kleinere spatiëring in de z-richting is noodzakelijk omdat de variatie van de SAR in deze richting veel groter is en omdat er meer punten nodig zijn voor een betere extrapolatie (nodig om de SAR waarden tegen het oppervlak van het fantoom te kennen). Figuren 26 (a) en (b) tonen een schets van de meetmethode en de xy-coördinaten van een 10 g-kubus waarin verschillende z-scans opgemeten zijn.



Figuur 26: (a) Balkvormig fantoom en meetprobe en (b) gebied waar de maximale SAR is bepaald en waarover wordt uitgemiddeld.

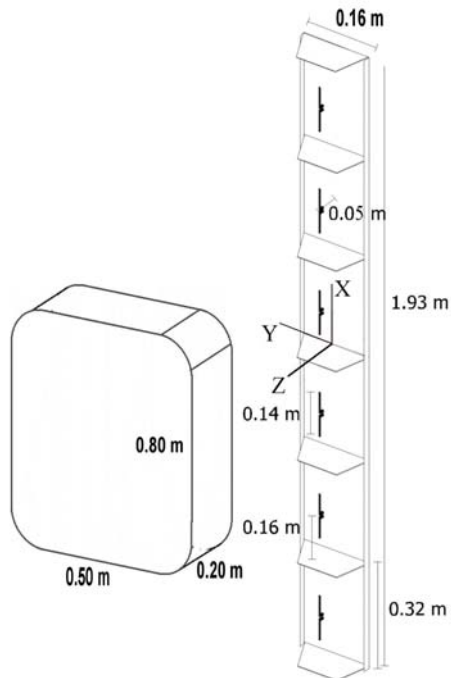
De extrapolatie wordt verduidelijkt in figuur 27. Hier wordt het verloop van de SAR genormeerd tot 1 W ingangsvermogen getoond als functie van de afstand tot het oppervlak van het fantoom wanneer het fantoom zich op 1 mm van de antenne bevindt. We kunnen slechts metingen uitvoeren tot 2,7 mm van het binnenoppervlak van het fantoom. De streeplijn is het resultaat van een exponentiële extrapolatie (de SAR varieert exponentieel nabij het oppervlak).



Figuur 27: Extrapolatie van SAR meting op de positie van maximale SAR wanneer het fantoom zich op 1 mm van de antenne bevindt.

3.7.3 Resultaten

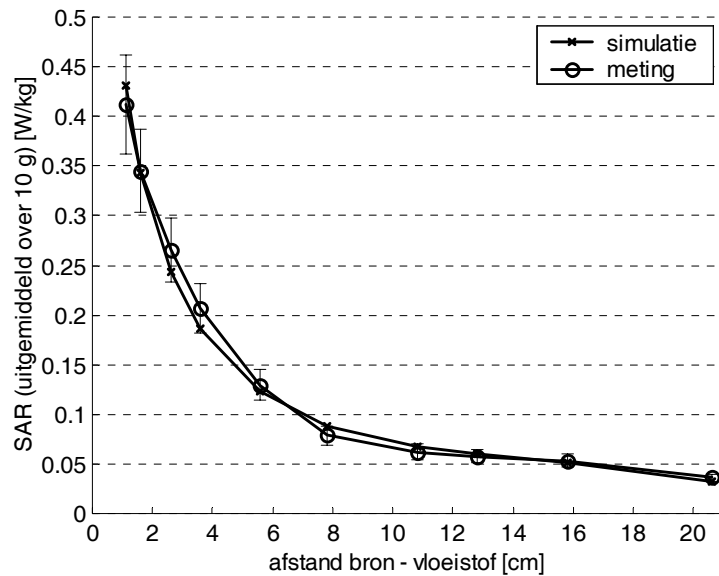
De simulaties worden uitgevoerd met een FDTD-programma (Finite Difference Time Domain). Hierbij wordt de configuratie van figuur 28 gesimuleerd waarbij het balkvormig fantoom zoals bij de metingen geplaatst wordt van 1 mm tot 20 cm van de antenne.



Figuur 28: Gesimuleerde antenne en balkvormig fantoom.

We hebben zowel de vloeistof als het fantoom zelf (dikte 10 ± 1 mm) gesimuleerd. Dus de vloeistof die menselijke weefsels simuleert bevindt zich minimaal 11 mm van de antenne. Om de lokale SAR te meten op afstanden van 1 mm tot 20 cm passen

we de methode beschreven in paragraaf 3.7.2 toe. Figuur 29 toont de opgemeten en gesimuleerde lokale SAR waarden uitgemiddeld over 10 g en genormeerd tot 1 W ingangsvermogen. De foutgrenzen [Joseph et al. (2003a)] zijn eveneens op de figuur weergegeven. We zien een goede overeenkomst tussen metingen en simulaties.



Figuur 29: Vergelijking tussen metingen en simulaties van de lokale SAR (uitgemiddeld over 10 g) genormeerd tot 1 W ingangsvermogen voor verschillende afstanden tot de antenne.

Tabel VII vergelijkt de bekomen uitgemiddelde lokale SAR waarden en de piek SAR voor metingen en simulaties voor afstanden antenne–vloeistof van 11 mm tot 56 mm. De relatieve afwijking tussen opgemeten en gesimuleerde lokale SAR (10 g) wordt eveneens getoond. We definiëren de relatieve afwijking als volgt:

$$\text{relatieve afwijking}[\%] = 100 \cdot \frac{\left| \frac{\text{meting} - \text{simulatie}}{\frac{\text{simulatie} + \text{meting}}{2}} \right|}{2} \quad (3)$$

De gemiddelde en maximale afwijking tussen metingen en simulaties voor een afstand van 11 mm tot 56 mm is respectievelijk 5,8 % en 10,2 %.

Tabel VII: Vergelijking tussen gemeten en met FDTD berekende lokale SAR (10 g) voor verschillende spatiëringen bij 947,5 MHz en bij 1 W genormaliseerd ingangsvermogen.

afstand antenne - vloeistof	SAR 10 g [W/kg]		afwijking [%]
	simulatie	meting	
11	0,43	0,41	4,4
16	0,34	0,35	0,7
26	0,24	0,26	8,3
36	0,19	0,21	10,2
56	0,13	0,13	4,4

Voor het volledige bereik zijn de gemiddelde en maximale afwijking respectievelijk 6,6 % en 13,1 % (op 20 cm). Deze afwijkingen zijn kleiner dan of vergelijkbaar met

de waarden in de literatuur beschreven [Qishan et al. (1999)], [Nicolas et al. (2001)], [Kuster and Balzano, (1992)].

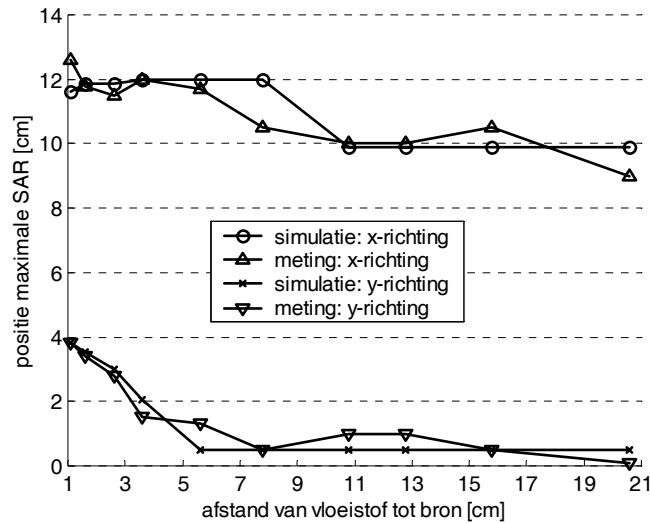
In [Qishan et al. (1999)] wordt een algemeen aanvaarde overeenkomst van 20 % gerapporteerd voor metingen en simulaties van 1 g uitgemiddelde SAR van draagbare telefoons. De afwijkingen zijn een gevolg van onzekerheden van de meetprobe, de nauwkeurigheid van de positionering van de antenne, afwijkingen van de gemeten permitiviteit ϵ_r en geleidbaarheid σ , de niet-perfecte bepaling van de maximale piek SAR en de maximale SAR uitgemiddeld over 10 g en de niet-perfecte modellering van de antenne en het fantoom voor de simulaties. In [Joseph et al. (2003a)] wordt omtrent de meetonzekerheid meer uitleg gegeven (gecombineerde onzekerheid van de SAR-evaluatie is $\pm 12\%$). In tabel VIII wordt de maximale piek SAR en de maximale lokale SAR uitgemiddeld over 10 g voor metingen en simulaties vergeleken.

Tabel VIII: Vergelijking tussen gemeten en met FDTD berekende maximale piek en lokale SAR (10 g) voor verschillende spatiëringen bij 947,5 MHz en bij 1 W genormaliseerd ingangsvermogen.

afstand bron-Vloeistof [mm]	piek SAR [W/kg]			SAR (10 g) [W/kg]		
	simulatie	meting	afw [%]	simulatie	meting	afw [%]
11	1,03	0,99	4,2	0,43	0,41	4,4
16	0,80	0,92	14,3	0,34	0,35	0,7
26	0,55	0,70	24,6	0,24	0,26	8,3
36	0,42	0,59	35,0	0,19	0,21	10,2
56	0,28	0,29	1,1	0,13	0,13	4,4
76	0,21	0,22	3,3	0,087	0,079	10,5
106	0,16	0,11	37,0	0,067	0,062	7,8
126	0,12	0,093	28,4	0,060	0,059	2,9
156	0,086	0,079	9,4	0,052	0,053	3,1
206	0,056	0,061	7,9	0,032	0,036	13,1

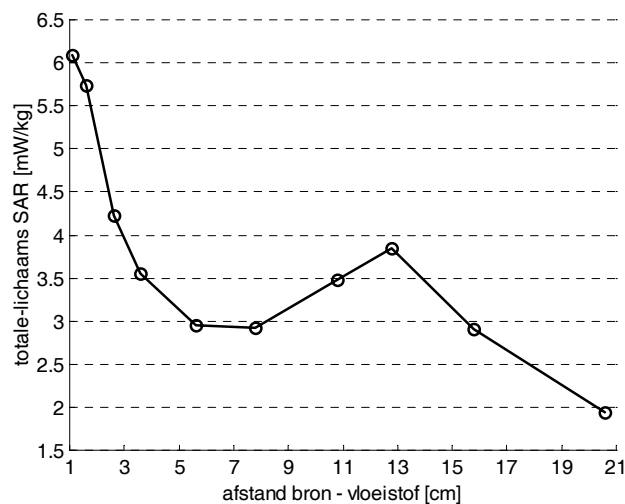
Noot: afw = afwijking

We moeten opmerken dat afwijkingen tussen de waarden van tabel VIII eveneens veroorzaakt worden door de niet-perfect gelijke positie van de maxima als functie van de afstand van het fantoom tot de antenne bij metingen en simulaties. De positie van de maxima in het xy-vlak (zie figuur 28) wordt voor metingen en simulaties vergeleken in figuur 30.



Figuur 30: Vergelijking van de positie van de maximale piek SAR voor metingen en simulaties.

De maximale dimensie van het fantoom in de x-richting is ± 40 cm, in de y-richting ± 25 cm. Aangezien zowel de antenne als het fantoom symmetrisch zijn t.o.v. $x = 0$ vinden we steeds 2 gelijke maxima gespiegeld t.o.v. $x = 0$ (zie figuur 28). De positie van de maximale piek SAR komt redelijk goed overeen voor metingen en simulaties: in de x-richting maximaal 1,5 cm en in de y-richting maximaal 0,8 cm afwijking. Wanneer de afstand vloeistof-antenne klein is zal de maximale piek SAR ongeveer ter hoogte van één van de centrale dipolen liggen ($x = \pm 12$ cm, $y = \pm 3,5$ cm). Naarmate de afstand vloeistof-antenne groter wordt zal de maximale piek SAR eerder naar het midden van de antenne ($y = 0$) opschuiven. Afwijkingen voor grotere afstanden van de antenne worden veroorzaakt doordat er niet meer een scherp maximum is. De maximale SAR wordt over een groter gebied uitgesmeerd. Tenslotte wordt in figuur 31 de gesimuleerde totale-lichaams SAR genormeerd tot 1 W ingangsvermogen getoond. De totale-lichaams SAR neemt toe tussen 5 en 12 cm door de invloed van de niet-centraal gelegen dipolen [Joseph et al. (2002b)].



Figuur 31: Simulatie van totale-lichaams SAR genormeerd tot 1 W ingangsvermogen.

3.8 Vergelijking veiligheidsafstanden van elektromagnetische velden en van SAR

Met behulp van de meettechniek ontwikkeld in [Joseph et al. (2003d)] en de meetprocedure van paragraaf 3.7 kunnen we een vergelijking maken tussen de veiligheidsafstanden van de EM velden en de SAR. De strengheidsparemeter SP zal hieronder gedefinieerd worden. Publicatie [Joseph et al. (2003c)] waarin de strengheidsparemeter besproken wordt toont de relevantie van dit onderzoek aan. Hieronder zullen de veiligheidsafstanden gegeven worden en ook zal de afstand bepaald worden vanaf wanneer het niet meer nodig is om de SAR te bepalen om de strengste veiligheidsafstand te kennen. SAR metingen zijn immers zeer duur en tijdsintensief en dus zou het interessant zijn te weten vanaf wanneer de SAR niet meer hoeft gemeten te worden om de strengste veiligheidsafstanden te bepalen.

3.8.1 Lokale SAR

Met behulp van de resultaten beschreven in paragraaf 3.7 kunnen de veiligheidsafstanden voor de lokale SAR voor verschillende ingangsvermogens bepaald worden. Om de tussenliggende waarden van de lokale SAR (10 g) te bepalen wordt er een kubische spline interpolatie uitgevoerd. In tabel IX worden de gesimuleerde en gemeten veiligheidsafstanden voor verschillende vermogens vergeleken.

Tabel IX: Vergelijking tussen metingen en simulaties van de veiligheidsafstanden D_{voor} in cm voor de lokale SAR (10 g) voor verschillende ingangsvermogens P_{in} bij 947,5 MHz.

P_{in} [W]	D_{voor} [cm] (SAR)		D_{voor} [cm] (SAR x3)	
	simulatie	meting	simulatie	meting
5	<1,1	<1,1	<1,1	<1,1
10	<1,1	<1,1	1,8	1,9
25	1,3	1,2	5,4	5,7
30	1,7	1,8	6,5	6,4
50	3,4	3,8	11,5	9,7
75	5,2	5,5	18,7	19,5
100	6,9	6,7	>20	>20

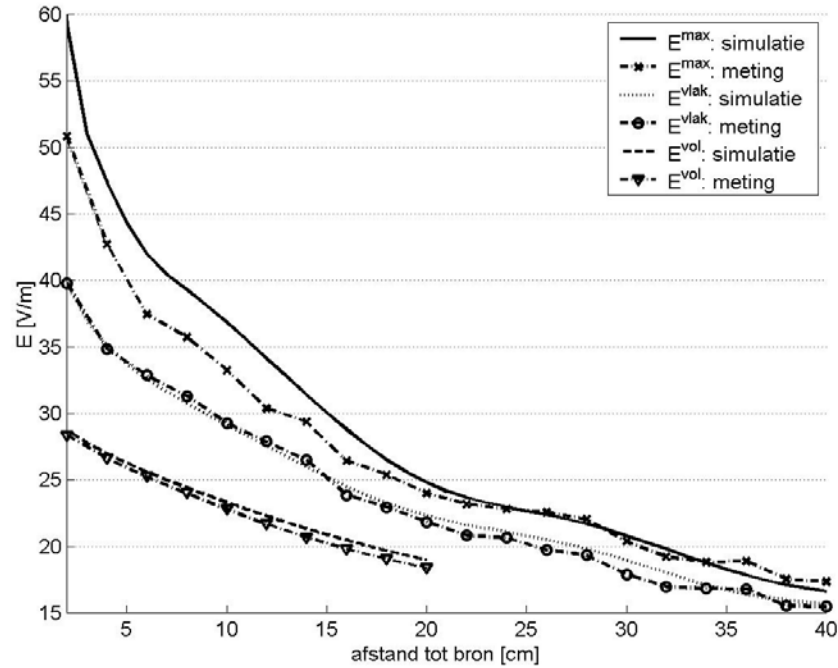
In deze tabel worden eveneens de veiligheidsafstanden voor de SAR (10 g) vermenigvuldigd met een factor 3 getoond. In paragraaf 3.9 wordt uitgelegd waarom deze factor 3 bij 947,5 MHz een goede keuze is om het niet-representatieve karakter van het fantoom in rekening te brengen. We zien dat er een goede overeenkomst tussen metingen en simulaties is.

3.8.2 EM velden

We bepalen de veiligheidsafstanden voor het elektrisch veld op 3 manieren: door de maximale veldwaarde in opeenvolgende vlakken te bepalen, door uit te middelen over een vlak en door uit te middelen over een volume [Joseph et al. (2003d)], [Joseph et al. (2002b)], [Joseph et al. (2003a)]. De maximale veldwaarde X^{max} ($X = E$ of H) bepalen we in opeenvolgende xy-vlakken van $70 \times 40 \text{ cm}^2$ parallel met de voorkant van de antenne. De vlakken waar we over uitmiddelen zijn xy-vlakken met afmetingen $70 \times 40 \text{ cm}^2$. We middelen uit in volumes van $70 \times 40 \times 20 \text{ cm}^3$. De afmetingen van het uitmiddelvolumen zijn zodanig gekozen dat ze de gemiddelde afmetingen van een romp van een mens voorstellen. De uitgemiddelde veldwaarden in een vlak noteren we X^{vlak} en uitgemiddelde veldwaarden in een volume noteren we X^{vol} ($X = E$ of H).

3.8.2.1 Elektrisch veld

We passen de meettechniek besproken in [Joseph et al. (2003d)] toe. Dus de metingen worden uitgevoerd met een Rohde & Schwarz ZVR netwerkanalyser. Als meetprobe gebruiken we een 2,2 cm lange dipool met dikte 0,5 mm. Figuur 32 toont de resultaten genormeerd tot 1 W ingangsvermogen in de vrije ruimte.



Figuur 32: Vergelijking tussen metingen en simulaties van $E^{\max}$, E^{vlak} en E^{vol} bij 1 W ingangsvermogen.

Op deze figuur hebben we geen foutgrenzen aangebracht omdat de figuur dan te druk zou worden. De onzekerheid van de EM veldbepaling bedraagt 9,8 % [Joseph et al. (2002b)]. Er is een geringe afwijking t.o.v. de resultaten van simulaties en metingen van paragraaf 3.6 en rapport [Joseph et al. (2002b)] omdat nu de exacte afmetingen en afstanden in rekening gebracht zijn. Belangrijk is op te merken dat de maximale gemeten en gesimuleerde veldwaarden beter overeenkomen dan in [Joseph et al. (2002b)]. Tabel X toont de maximale en gemiddelde afwijkingen van de grootheden van figuur 32.

Tabel X: Procentuele afwijking tussen metingen en simulaties van de elektrische veldwaarden bij 947,5 MHz.

E-veld	relatieve afwijking [%]	
	gemiddeld	maximum
$E^{\max}$	5,5	14,1
E^{vlak}	2,2	5,8
E^{vol}	2,3	3,3

Deze afwijkingen zijn klein t.o.v. in de literatuur gepubliceerde data. In tabel XI worden de gesimuleerde en gemeten veiligheidsafstanden — bepaald op basis van de grootheden $E^{\max}$, E^{vlak} en E^{vol} — voor verschillende vermogens vergeleken.

Tabel XI: Vergelijking van simulaties en metingen van de veiligheidsafstanden D_{voor} in cm voor het elektrisch veld voor verschillende ingangsvermogens P_{in} bij 947,5 MHz.

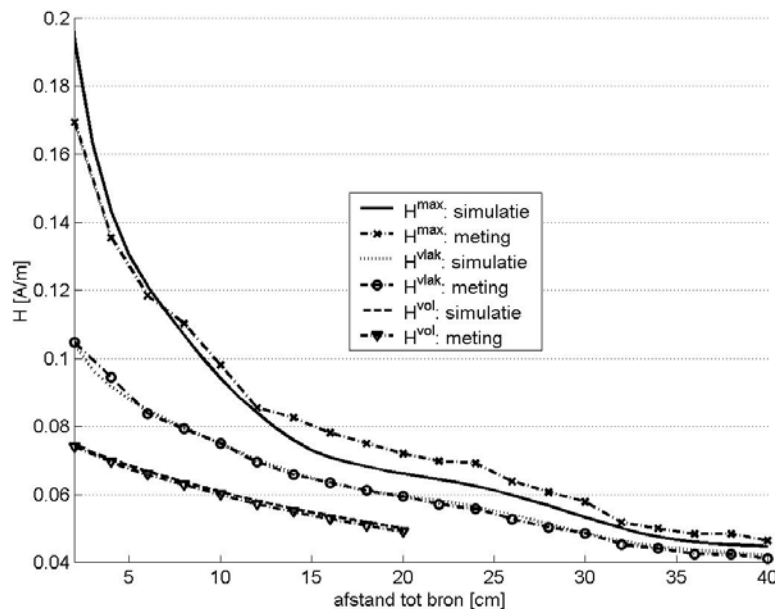
P_{in} [W]	D_{voor} (simulaties) [cm]			D_{voor} (metingen) [cm]		
	max	vlak	vol	max	vlak	vol
1	0,7	<0,1	<0,1	<2*	<2*	<2*
5	6,5	1,7	<0,1	4,4	<2*	<2*
7	11,5	4,2	0,2	8,8	3,9	<2*
10	15,7	10,0	1,8	14,1	10,0	2,0
15	21,7	17,1	9,0	20,2	16,0	8,2
20	30,4	25,6	15,6	29,6	23,9	14,0
30	39	34,7	>20	39,8	35,8	>20

* de metingen zijn uitgevoerd vanaf 2 cm om de invloed van de meetprobe voldoende klein te houden (< 5 %) en de koppeling tussen meetprobe en antenne te beperken.

We zien dat er een zeer goede overeenkomst tussen metingen en simulaties is. De afwijkingen bij de maximale veldwaarden zijn het grootst maar nog steeds klein in vergelijking met andere resultaten beschreven in de literatuur [Nicolas et al. (2001)]. Afwijkingen tussen metingen en simulaties worden veroorzaakt door de meetprobe (antennekalibratie, invloed meetprobe zelf), door positioneringsfouten en de niet-perfekte modellering van de antenne in de simulaties.

3.8.2.2 Magnetisch veld

We gaan op analoge wijze te werk als bij de bepaling van het elektrisch veld. Als meetprobe gebruiken we een split-shield lusprobe met diameter 1,3 cm en dikte 0,5 mm. Figuur 33 toont de resultaten genormeerd tot 1 W ingangsvermogen in de vrije ruimte.



Figuur 33: Vergelijking tussen metingen en simulaties van H^{max} , H^{vlak} en H^{vol} bij 1 W ingangsvermogen.

Tabel XII toont de maximale en gemiddelde afwijkingen van de grootheden van figuur 33. Deze afwijkingen zijn klein t.o.v. in de literatuur gepubliceerde data.

Tabel XII: Procentuele afwijking tussen metingen en simulaties van de magnetische veldwaarden bij 947,5 MHz.

relatieve afwijking [%]		
H-veld	gemiddeld	maximum
$H^{\max}$	6,3	12,3
H^{vlak}	1,2	3,0
H^{vol}	1,6	2,1

In tabel XIII worden de gesimuleerde en gemeten veiligheidsafstanden — bepaald op basis van de grootheden $H^{\max}$, H^{vlak} en H^{vol} — voor verschillende vermogens vergeleken.

Tabel XIII: Vergelijking van simulaties en metingen van de veiligheidsafstanden D_{voor} in cm voor het magnetisch veld voor verschillende ingangsvermogens P_{in} bij 947,5 MHz.

P_{in} [W]	D_{voor} (simulaties) [cm]			D_{voor} (metingen) [cm]		
	max	vlak	vol	Max	vlak	vol
1	1,2	<0,1	<0,1	<2*	<2*	<2*
5	7,6	1,5	<0,1	8,0	<2*	<2*
7	10,2	3,7	0,2	10,6	4,2	<2*
10	13,5	8,8	1,3	16,0	8,7	<2*
15	22,9	15,9	8,0	26,0	15,8	7,3
20	28,9	25,2	14,7	30,8	24,4	13,3
30	38,9	33,6	>20	>40	32,0	>20

*de metingen zijn uitgevoerd vanaf 2 cm om de invloed van de meetprobe voldoende klein te houden (< 5 %) en de koppeling tussen meetprobe en antenne te beperken.

We zien dat er een zeer goede overeenkomst tussen metingen en simulaties is. We kunnen dezelfde conclusies trekken als in paragraaf 3.8.2.1.

3.8.3 Vergelijking van D_{voor} via E-veld en via SAR

We vermenigvuldigen de gesimuleerde en gemeten lokale SAR met een veiligheidsfactor 3 i.p.v. 2 voorgesteld door [CENELEC (2002)]. Deze factor wordt in rekening gebracht omdat het balkvormig fantoom qua vorm afwijkt van een realistisch mensmodel en omdat het balkvormig fantoom bovendien homogeen is. In paragraaf 3.9 wordt verduidelijkt dat deze factor 3 bij 947,5 MHz een betere keuze als veiligheidsfactor is dan de arbitraire factor 2 van [CENELEC (2002)] om het fantoom in rekening te brengen. We tonen in paragraaf 3.9 eveneens dat deze factor frequentie-afhankelijk is en gelijk is aan 3 bij 947,5 MHz. In tabel XIV vergelijken we de veiligheidsafstanden bij 10 en 20 W.

Tabel XIV: Veiligheidsafstanden D_{voor} voor elektrisch veld en SAR (10 g uitmiddeling) gebruik makend van balkvormig fantoom bij 10 en 20 W ingangsvermogen bij 947,5 MHz.

		D_{voor} [cm] 10 W		D_{voor} [cm] 20 W	
		simulatie	meting	simulatie	Meting
E-veld	maximum	15,7	14,1	30,4	29,6
	uitmiddeling vlak	10,0	10,0	25,6	23,9
	uitmiddeling volume	1,8	2,0	15,6	14,0
SAR (x3)	totale-lichaams SAR	< 1,1	< 1,1	< 1,1	< 1,1
	lokale SAR (10 g)	1,8	1,9	4,2	4,7

We zien dat de veiligheidsafstanden bepaald d.m.v. het elektrisch veld steeds strenger zijn dan de veiligheidsafstanden van de SAR wanneer de maximale veldwaarde bepaald wordt of wanneer er uitgemiddeld wordt in een vlak voor de EM metingen en simulaties. Bij uitmiddeling in een volume kan er een onderschatting gebeuren (b.v. bij 10 W) t.o.v. de veiligheidsafstand bij bepaling van de lokale SAR. We kunnen dus concluderen dat de veiligheidsafstanden in het nabije veld voor het elektrisch veld wanneer de uitmiddeling van het EM veld gebeurt in een vlak of door bepaling van de maximale veldwaarde strenger zullen zijn dan de veiligheidsafstanden bepaald door gebruik te maken van de basisrestricties voor de SAR. Deze conclusie is voor zowel metingen als simulaties geldig. We merken nog eens op dat een veiligheidsfactor 3 in rekening is gebracht bij de SAR in het balkvormig fantoom.

3.8.4 Strengheidsparemeter SP

Om de veiligheidsafstanden bekomen in paragraaf 3.8.3 grondiger te onderzoeken en te vergelijken definiëren we de strengheidsparemeter. Hierover is er een publicatie verschenen [Joseph et al. (2003c)].

3.8.4.1 Algemeen

De strengheidsparemeter SP is gedefinieerd als de verhouding van de bepaalde E-veldwaarde/referentieniveau tot de bepaalde SAR-waarde/basisrestrictie:

$$SP = \frac{\frac{E}{L_E}}{\frac{SAR}{L_{SAR}}} \quad (4)$$

Hierbij zijn

E: de veldwaarde (maximum op een positie, uitmiddeling over vlak of uitmiddeling over een volume) bij een bepaald ingangsvermogen.

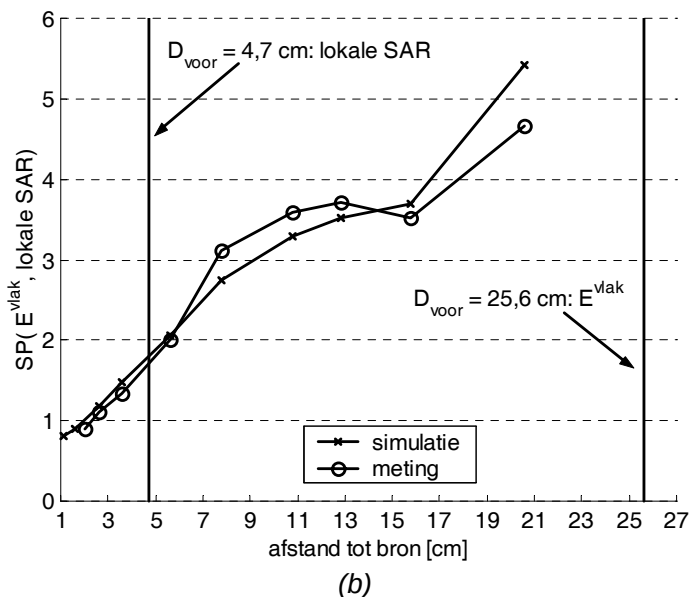
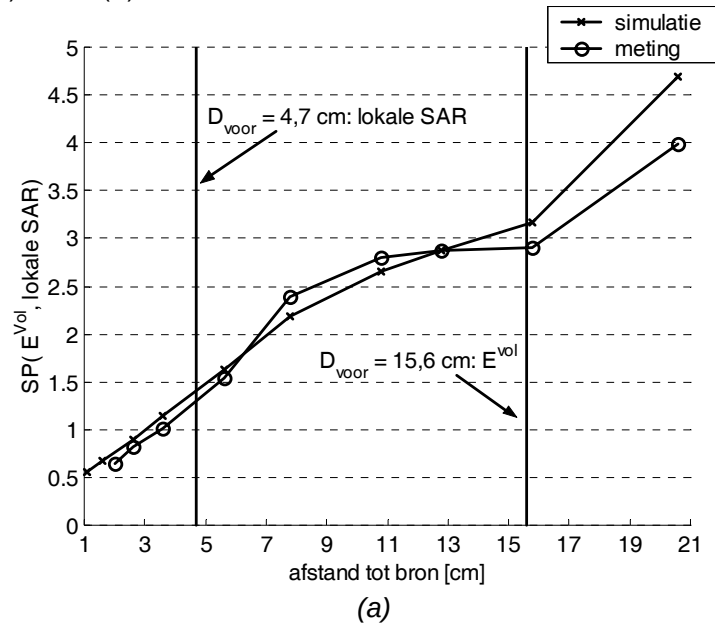
SAR: de gesimuleerde SAR waarde (totale-lichaams of lokale SAR) in een fantoom bij een bepaald ingangsvermogen.

L_E : referentieniveau voor het elektrisch veld bij de beschouwde frequentie.

L_{SAR} : basisrestrictie voor totale-lichaams of lokale SAR bij de beschouwde frequentie.

Wanneer op een plaats $E = L_E$ en de parameter $SP < 1$, dan zal het nodig zijn SAR metingen of simulaties uit te voeren om de grootste veiligheidsafstanden te bekomen. **De grootheid SP geeft aan hoeveel maal de bepaalde E-veldsterkte strenger is t.o.v. het referentieniveau dan de SAR waarde strenger is dan de overeenkomstige basisrestrictie.**

In hetgeen dat volgt wordt er steeds een veiligheidsfactor 3 in rekening gebracht voor de bepaling van de SAR in het balkvormig fantoom (zie paragraaf 3.9). We tonen de strengste (laagste) SP waarden namelijk $SP(E^{vol}, \text{lokale SAR})$ en $SP(E^{vlak}, \text{lokale SAR})$ bij 20 W ingangsvermogen van de Kathrein 736863 antenne in figuren 34 (a) en 34 (b).



Figuur 34: (a) $SP(E^{vol}, \text{lokale SAR})$ en (b) $SP(E^{vlak}, \text{lokale SAR})$ voor metingen en simulaties bij 20 W ingangsvermogen.

Op figuren 34 (a) en 34 (b) worden de strengste veiligheidsafstanden voor de veldwaarden en de lokale SAR (x3) met verticale lijnen weergegeven. Hierdoor worden de figuren in drie gebieden verdeeld afhankelijk of de veldwaarde en SAR al dan niet groter zijn dan hun overeenkomstig referentieniveau en basisrestrictie. Bij de veiligheidsafstanden D_{voor} bij 20 W zijn zowel $SP(E^{vol}, \text{lokale SAR})$ als $SP(E^{vlak}, \text{lokale SAR})$ steeds > 1 en levert de bepaling van de elektrische velden door uitmiddeling in een volume of een vlak een strengere veiligheidsvoorwaarde dan de bepaling van de

SAR. Tenslotte toont tabel XV bij welke afstanden $SP = 1$ bij 20 W ingangsvermogen.

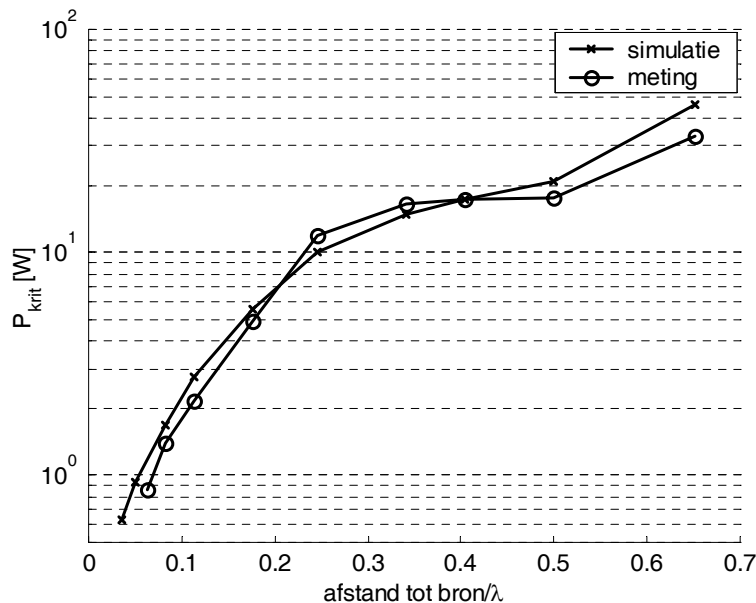
Tabel XV: Afstanden waarbij $SP = 1$ bij 20 W ingangsvermogen bij 947,5 MHz.

SP	afstand ($SP = 1$) [cm]	
	Simulatie	meting
$SP(E^{vol}, \text{lokale SAR})$	3,0	3,5
$SP(E^{vlak}, \text{lokale SAR})$	1,9	2,3

We bepalen nu het kritisch ingangsvermogen [Joseph et al. (2003a)], [Joseph et al. (2003c)] voor metingen en simulaties. Het kritisch ingangsvermogen is gedefinieerd als het ingangsvermogen waarbij $SP = 1$, dus als de marge tussen E en het referentieniveau gelijk is aan de marge tussen de SAR en de basisrestrictie. Dit kritisch ingangsvermogen P_{krit} wordt als volgt bepaald:

$$SP|_{1W} \cdot \frac{1}{\sqrt{P_{krit}}} = 1 \Rightarrow P_{krit} = (SP|_{1W})^2 \quad (5)$$

Figuur 35 toont het kritisch ingangsvermogen voor metingen en simulaties.

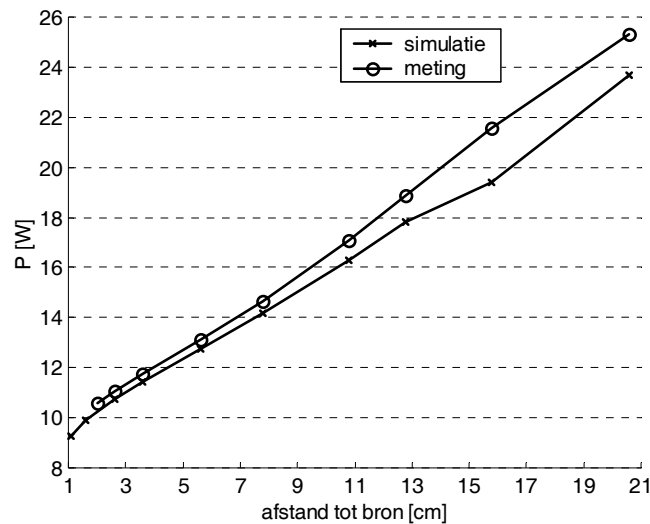


Figuur 35: P_{krit} voor $SP(E^{vol}, \text{lokale SAR})$ bij 947,5 MHz voor het balkvormig fantoom.

P_{krit} is gelijk aan 10 W bij afstanden gelijk aan $0,23\lambda$ (7,4 cm) en $0,25\lambda$ (7,8 cm) voor respectievelijk metingen en simulaties. Dus voor afstanden groter dan $0,25\lambda$ zullen elektrische veldwaarden bij 10 W ingangsvermogen steeds de strengste veiligheidsvoorwaarden leveren (de extra veiligheidsfactor 3 is voor de SAR hierbij in rekening gebracht).

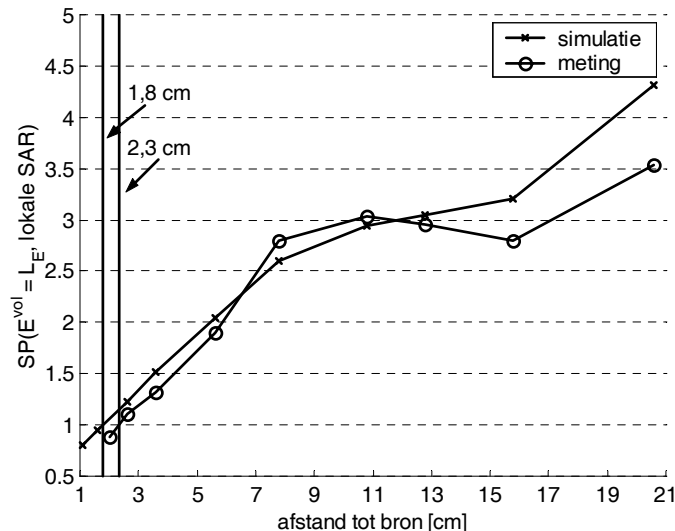
3.8.4.2 SP waarde als E-veld gelijk is aan referentieniveau

We bepalen nu de afstand vanaf wanneer de SAR-route niet meer nodig is om de strengste veiligheidsafstand te bepalen als het E-veld gelijk is aan de referentiewaarde nl. $E^{vol} = L_E = 92,34 \text{ V/m}$ bij 947,5 MHz. We doen dit met behulp van $SP(E^{vol} = L_E, \text{lokale SAR})$. **Deze parameter toont voor elke positie hoeveel maal de veiligheidsafstand voor de E-veldsterkte strenger is dan de veiligheidsafstand van de lokale SAR.** Voor elke positie moeten we dan het vermogen bepalen waarbij $E^{vol} = L_E$. Figuur 36 toont dit vermogen voor verschillende de afstanden voor zowel metingen als simulaties. We zien een goede overeenkomst tussen beiden. Bij dit vermogen worden dan de SAR-waarden bepaald (en vermenigvuldigd met een veiligheidsfactor 3).



Figuur 36: Ingangsvermogen nodig voor $E^{vol} = L_E$.

We bepalen dan $SP(E^{vol} = L_E, \text{lokale SAR})$ voor metingen en simulaties. Op basis van deze parameter kunnen we de afstanden — voor metingen en simulaties — bepalen vanaf waar geen SAR-bepaling nodig is om de strengste veiligheidsafstand te kennen. Figuur 37 toont deze SP waarden.



Figuur 37: $SP(E^{vol} = L_E, \text{lokale SAR})$ bij 947,5 MHz voor metingen en simulaties.

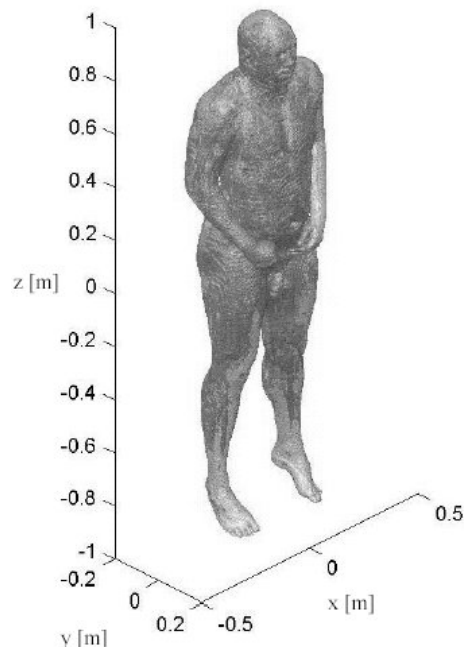
In het gebied links van de verticale streeplijn (voor metingen lijn op 2,3 cm, voor simulaties op 1,8 cm) is de lokale SAR $> L_{SAR}$, rechts van de streeplijn is de lokale SAR $< L_{SAR}$. $SP(E^{vol} = L_E, \text{lokale SAR}) < 1$ tot 1,8 cm voor simulaties en 2,3 cm voor de metingen met het balkvormig fantoom. **We kunnen concluderen dat voor afstanden groter dan 1,8 cm (simulaties) respectievelijk 2,3 cm (metingen) de veiligheidsmarge op basis van de elektrische veldwaarden de grootste is.** Het is dan niet nodig de lokale of totale-lichaams SAR te bepalen om de grootste veiligheidsmarge te bekomen. De vermogens waarbij $SP = 1$ bij deze afstanden zijn respectievelijk 10,0 en 10,9 W voor simulaties en metingen.

3.9 Nieuwe veiligheidsfactor voor de bepaling van de SAR in een fantoom

In deze paragraaf zullen we een nieuwe veiligheidsfactor voorstellen voor de bepaling van de SAR in een homogeen fantoom. Uit onze resultaten blijkt dat de arbitraire factor 2 voorgesteld door de standaardisatie-organisatie CENELEC [CENELEC (2002)] geen goede keuze is. De veiligheidsfactor is zowel van de frequentie als van het type fantoom afhankelijk. Bij 947,5 MHz is die factor voor het balkvormig fantoom 3 i.p.v. 2 voorgesteld door CENELEC. Voor dit onderzoek kijken we naar inval van vlakke golven. De resultaten zijn beschreven in [Joseph et al. (2003e)].

3.9.1 Realistisch mensmodel

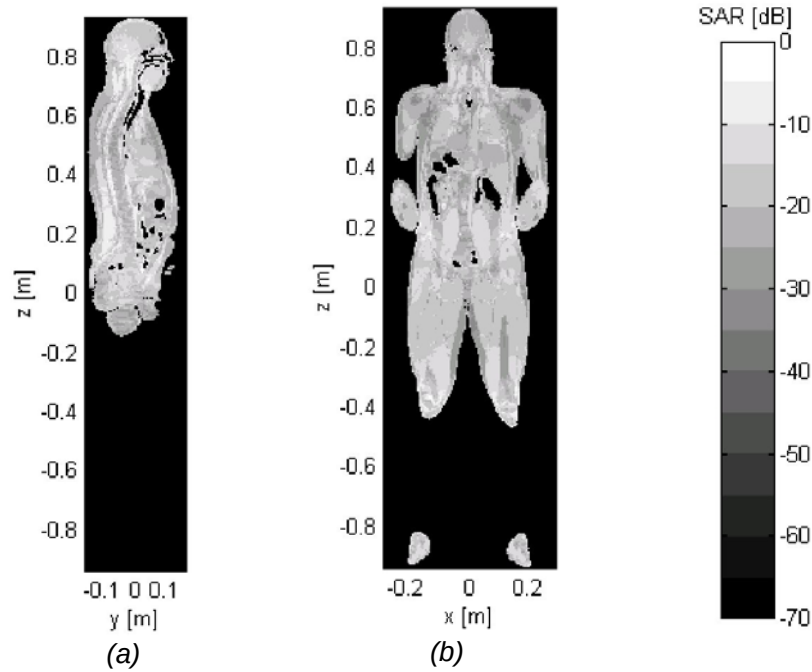
We maken gebruik van FDTD99 ontwikkeld door Brooks Airforce Base [Durney et al. (1997)]. In het kader van het Visible Human Project is er een numeriek mensmodel ontwikkeld. In [Bernardi et al. (2000)] wordt er eveneens van dit model gebruik gemaakt. In tegenstelling tot het balkvormig fantoom en het sferoïdaal fantoom is dit een niet-homogeen model. De celgrootte is $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$. De lengte van de man is 1,87 m en zijn massa is 105 kg. Figuur 38 toont het gebruikte model van een mens.



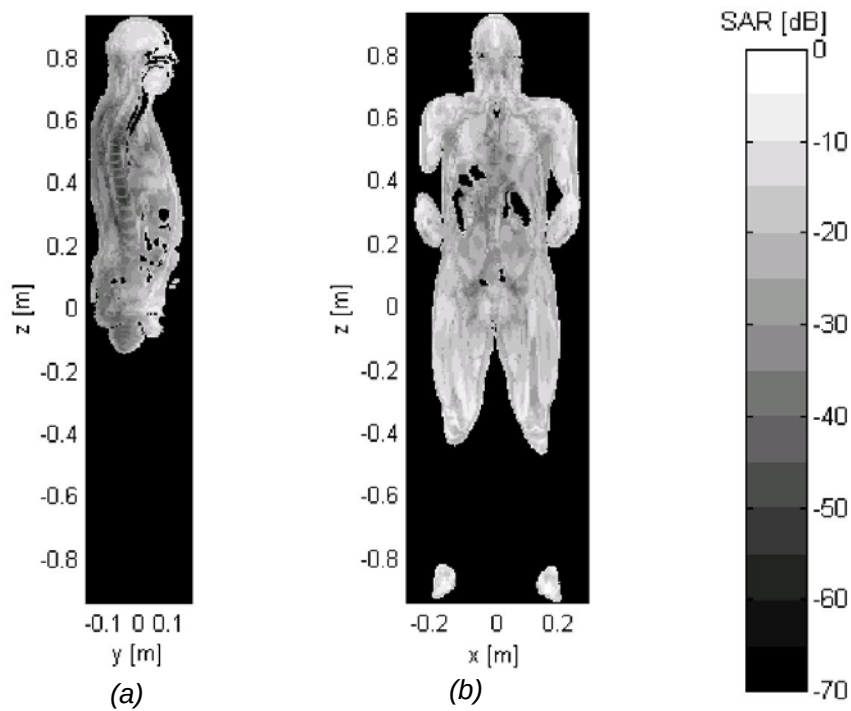
Figuur 38: Mensmodel ontwikkeld door Brooks Airforce Base.

We bepalen $SP(E^{vol}, \text{totale-lichaams SAR})$, deze SP waarde is de strengste (minimaal) bij inval van vlakke golven. We onderzoeken in eerste instantie de SAR van het mensmodel bij 2 frequenties. We bekijken 947,5 MHz omdat dit de frequentie

is die ons interesseert en 73 MHz omdat er bij deze frequentie voor een mens resonantie optreedt. De polarisatie van het E-veld is volgens de lengterichting van het realistisch mensmodel. Bij deze polarisatie zullen de hoogste SAR waarden bekomen worden. Dit is dus een "worst-case" studie. Figuren 39 (a) en (b) tonen de resultaten bij 73 MHz. Figuren 40 (a) en (b) tonen de resultaten bij 947,5 MHz.



Figuur 39: SAR distributie bij 73 MHz in (a) yz-vlak ($x = 0$) en (b) xz-vlak ($y = 0$).

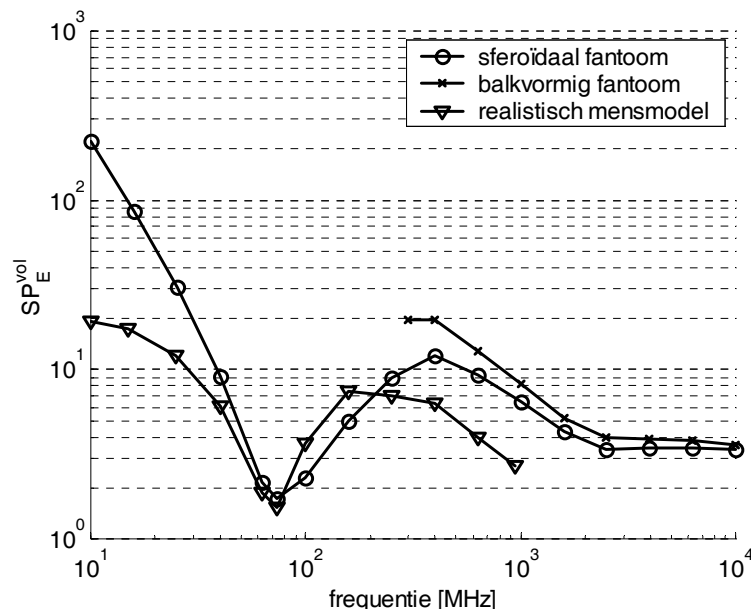


Figuur 40: SAR distributie bij 947,5 MHz in (a) yz-vlak ($x = 0$) en (b) xz-vlak ($y = 0$).

We zien dat bij 73 MHz (maximale SAR in het yz-vlak = 3,4 W/kg, maximale SAR in het xz-vlak = 10,6 W/kg) de SAR waarden veel hoger liggen en dat de velden dieper in het lichaam doordringen dan bij 947,5 MHz (maximale SAR in het yz-vlak = 3,1 W/kg, maximale SAR in het xz-vlak = 2,2 W/kg). Deze SAR waarden zijn bij een invallende vermogendichtheid van 10 W/m^2 .

3.9.2 Vergelijking tussen de verschillende modellen

In deze paragraaf kijken we in welke mate de waarden van $SP(E^{\text{vol}}, \text{totale-lichaams SAR})$ voor het balkvormig fantoom en het sferoïdaal fantoom afwijken van een realistisch mensmodel bij inval van vlakke golven. Voor het sferoïdaal fantoom maken we gebruik van een semi-empirische formule opgesteld door Durney [Durney et al. (1979)]. Voor het balkvormig fantoom maken we gebruik van uitdrukkingen opgesteld in [Joseph et al. (2002b)]. Figuur 41 maakt een vergelijking voor de 3 modellen in het frequentiegebied 10 MHz tot 10 GHz.



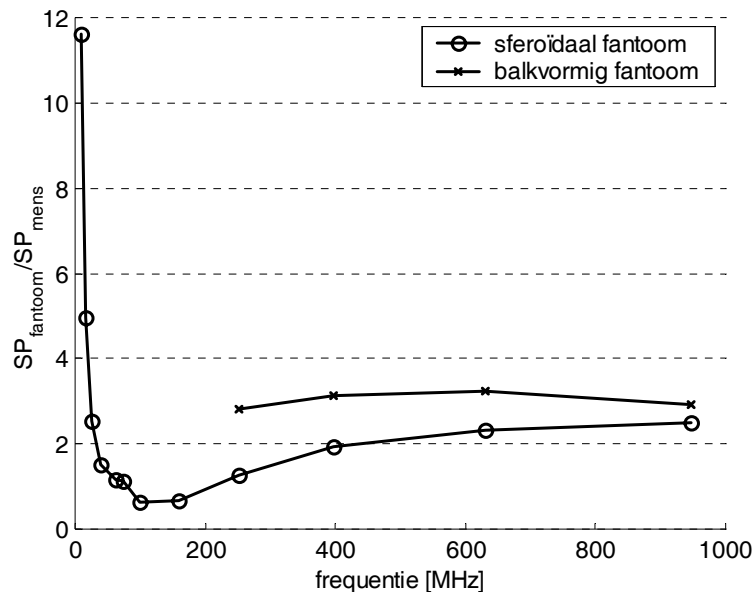
Figuur 41: $SP_E(E^{\text{vol}}, \text{totale-lichaams SAR})$ voor 3 mensmodellen als functie van de frequentie van 10 MHz tot 10 GHz.

Het model voor het balkvormig fantoom is geldig vanaf 300 MHz. Het mensmodel is bruikbaar tot 1500 MHz. We kunnen concluderen dat bij inval van een vlakke golf $SP > 1$ voor het volledige frequentiegebied voor de 3 onderzochte modellen. De minimale waarde ligt bij 73 MHz. E-veldwaarden leveren dus steeds de strengste veiligheidsmarges bij inval van vlakke golven. Het realistisch mensmodel levert meestal de strengste voorwaarden. Het sferoïdaal fantoom wijkt minder af van het mensmodel dan het balkvormig fantoom. Tabel XVI vergelijkt de verschillende modellen bij 73 en 947,5 MHz.

Tabel XVI: Vergelijking van SP voor verschillende modellen bij 73 en 947,5 MHz.

model	73 MHz		947,5 MHz	
	SP [-]	SP/SP _{mens}	SP [-]	SP/SP _{mens}
balkvormig fantoom	-	-	7,9	2,9
sferoïdaal fantoom	1,7	1,1	6,7	2,5
mensmodel	1,5	1	2,7	1

In deze tabel wordt eveneens $SP_{\text{fantoom}}/SP_{\text{mens}} = SAR_{\text{mens}}/SAR_{\text{fantoom}}$ getoond. De bijkomende "correctiefactor" 2 (omwille van het feit dat een mens afwijkt van het fantoom dat bovendien homogeen is) waarmee de lokale SAR moet vermenigvuldigd worden volgens [CENELEC (2002)] blijkt niet een goede keuze te zijn. Deze factor zou frequentie-afhankelijk moeten zijn, uit de tabel blijkt dat deze factor bij 947,5 MHz ongeveer 3 zou moeten zijn voor het balkvormig fantoom. Figuur 42 toont $SP_{\text{fantoom}}/SP_{\text{mens}}$ voor het balkvormig en sferoïdaal fantoom als functie van de frequentie.

**Figuur 42:** $SP_{\text{fantoom}}/SP_{\text{mens}}$ in het gebied 10 MHz tot 1 GHz.

Deze theoretische factor $SP_{\text{fantoom}}/SP_{\text{mens}}$ zou dus beter in rekening gebracht worden voor de bepaling van de SAR in een fantoom dan de arbitraire correctiefactor 2 voorgesteld door [CENELEC (2002)]. We moeten opmerken dat de factor $SP_{\text{fantoom}}/SP_{\text{mens}}$ die wij voorstellen gebaseerd is op de *totale-lichaams* SAR bij inval van vlakke golven en dat deze factor $SP_{\text{fantoom}}/SP_{\text{mens}}$ zowel voor de bepaling van de lokale SAR als de totale-lichaams SAR wordt gebruikt. Bij inval van vlakke golven zal de totale-lichaams SAR echter de strengste voorwaarden opleveren en bovendien is deze grootheid de beste maat om de invloed van een fantoom in rekening te brengen.

Het voordeel van het gebruik van dergelijke factor is dat voor metingen en simulaties een eenvoudig en homogeen (b.v. balkvormig) model kan gebruikt worden en dat door deze correctiefactor in rekening te brengen toch realistische SAR waarden worden bekomen.

4 VERSPREIDING EN VALORISATIE

Voor de verspreiding van de resultaten van dit project en de valorisatie zullen de wetenschappelijke publicaties en de input voor standaardisatie-organisaties bijdragen leveren. reeds 3 A1-artikels werden gepubliceerd of aanvaard: 2 in IEEE Transactions [Joseph et al. (2002e)] (IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement) en [Joseph et al. (2003b)] (IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility) en 1 in IEE Electronics Letters [Joseph et al. (2003d)]. Deze tijdschriften zorgen voor een grote verspreiding en hebben een grote impact.

Verder zijn er 7 conferentieartikels gepubliceerd of aanvaard voor publikatie [Joseph et al. (2001c)], [Joseph et al. (2002d)] (URSI, *General Assembly of the International Union of Radio Science*), [Joseph et al. (2002c)], [Joseph et al. (2003c)] (BEMS *Bioelectromagnetics Society*), [Joseph et al. (2001d)] (PhD Symposium), [Olivier et al. (2001)] (EBEA, *European BioElectromagnetics Association*), [Martens et al. (2002)] (COST281, *European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research*). Er zijn ook nog 2 artikels naar internationale tijdschriften opgestuurd [Joseph et al. (2001e)], [Joseph et al. (2003e)] voor "review".

Er waren in het kader van dit project bijdragen en aanbevelingen voor de standaardisatie-organisatie CENELEC in het technisch comité TC106 voor de basisstationstandaarden put-into-service (EN50XXX) en put-into-field (EN50YYY).

Er waren eveneens bijgedragen voor de werkgroepen in het Europese COST281 project (www.cost281.org) waarbij informatie wordt doorgegeven aan officiële organisaties zoals WHO, ICNIRP, NRPB, en CENELEC.

De resultaten werden gerapporteerd d.m.v. halfjaarlijkse tussentijdse rapporten en de resultaten werden ook gepresenteerd voor de begeleidingscommissie met als leden: Buyse Dany (Agoria), Calderone Anna (Federaal Wetenschapsbeleid), Nicolas Jacques (MINECO), Niemegeers Philippe (Proximus) en Van Den Bossche Stefan (Mobistar). Deze personen zorgen eveneens voor verspreiding van de resultaten van dit project binnen hun organisaties.

5 BALANS EN PERSPECTIEVEN

De balans van dit project is zeer positief zoals de resultaten en publicaties (samenvatting D en paragraaf 4 hierboven) aantonen. 3 A1-artikels en 7 conferentieartikels zijn gepubliceerd of reeds aanvaard en 2 papers zijn nog in "review". Een artikel over de vergelijking van de veiligheidsafstanden van de EM velden en de SAR wordt binnenkort gefinaliseerd en opgestuurd een internationaal tijdschrift.

De bruikbaarheid van de resultaten in de technische werkgroepen van TC 106 van CENELEC is zeer groot.

De mogelijkheid wordt nagegaan of de resultaten ook specifiek in België bruikbaar zijn door verspreiding van de resultaten bij Agoria, BIN, Ministerie van Economische Zaken en de GSM operatoren.

Dit onderzoeksproject houdt ook perspectieven in voor nieuw onderzoek. In dit werk werden de bronnen beperkt tot antennes opererend bij RF frequenties. Uitbreiding naar andere bronnen en frequenties is een nog niet ontgonnen onderzoeksdomein. De uitwerking van een procedure voor "in-the-field" metingen in de industrie is ook een belangrijk onderzoeksdomein.

DANKWOORD

We wensen het Federaal Wetenschapsbeleid onder de standaardisatie programma's te danken voor de financiële steun.

We wensen eveneens de leden van de wetenschappelijke begeleidingscommissie te bedanken voor de grondige analyse van het wetenschappelijk onderzoek en de rapporten en voor de aanbreng van interessante ideeën.

REFERENTIES

[Adair et al. (1999)] E. Adair, J. Bergeron et al., Jan./Feb. 1999, "Human Exposure to Electric and Magnetic Fields from RF Sealers and Dielectric Heaters," *IEEE Engineering in Medicine and Biology*, pp. 88-90.

[ANSI C63.4 1998] American National Standard for Electromagnetic Compatibility, 1998, "Radiated Emission Measurements in Electromagnetic Interference (EMI) control Calibration of Antennas (9 kHz to 40 GHz)".

[Bernardi et al. (2000)] P. Bernardi, M. Cavagnaro, S. Pisa, and E. Piuze, Nov. 2000 "Human exposure to radio base-station antennas in urban environment," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 48, pp. 1996–2002.

[Brishoual et al. (2001)] M. Brishoual, C. Dale, J. Wiart, and J. Citerne, Aug. 2001, Methodology to interpolate and extrapolate SAR measurements in a volume in dosimetric experiment," *IEEE Trans. Electromag. Compat.*, vol. 43, no. 3, pp. 382 – 389.

[Bracke (2002)] W. Bracke, academiejaar 2001-2002, "Interpolatie en extrapolatie van SAR metingen voor draadloze telefoons," *scriptie burgerlijk elektrotechnisch ingenieur*, Vakgroep Informatietechnologie, Universiteit Gent, België.

[Causebrook (1998)] J.H. Causebrook, Sept. 1998, "Mobile Phone Network Operator's Actions on RF Safety," *Radiation protection dosimetry*, Vol. 83, pp. 171 – 175.

[CENELEC (2002)] European Committee for Electrotechnical Standardization, Sept. 2002, "Basic standard for the calculation and measurement of electromagnetic field strength and SAR related to human exposure from radio base stations and fixed terminal stations for wireless telecommunication systems (110 MHz – 40 GHz)".

[Chadwick (1998)] P. Chadwick, Sept. 1998, "Assessment of industrial exposure to magnetic fields," *Radiation protection dosimetry*, Vol. 83, pp. 47-52.

[Chen et al. (1989)] J. Chen, Om P. Gandhi, and D. Conover, Jan. 1989, "Electromagnetic Deposition in an Anatomically Based Model of Man for Leakage Fields of a Parallel-Plate Dielectric Heater," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, Vol. 37 , No. 1, pp. 274-280.

[Chen et al. (1991)] J. Chen, Om P. Gandhi, and D. Conover, Aug. 1991, "SAR and Induced Distributions for Operator Exposure to RF Dielectric Sealers," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, Vol. 33 , No. 3, pp. 252-261.

[Chung and Feng (1999)] Chung-Yi Li, and Chao-Kang Feng, July 1999, "An Evaluation of Radio Frequency Exposure from Therapeutic Diathermy Equipment," *Industrial Health*, Vol. 37, pp. 465-468.

[Dahme (1998)] M. Dahme, "Residential RF Exposures, Sept. 1998, " *Radiation protection dosimetry*, Vol. 83, pp. 113-117.

[Dhaene et al. (1994)] T. Dhaene, L. Martens, and D. De Zutter, Apr. 1994, "Extended Bennia-Riad Criterion for Iterative Frequency-Domain Deconvolution," *IEEE Trans. Instr. Meas.*, vol. 42, No. 2, pp. 176-180.

[Durney et al. (1979)] C. H. Durney, M. F. Iskander, H. Massoudi, and C. C. Johnson, Aug. 1979, "An Empirical formula for Broad-Band SAR Calculations of Prolate Spheroidal Models of Humans and Animals," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-27, No. 8, pp. 758 – 763.

[Durney et al. (1997)] C. H. Durney, H. Massoudi, and M. F. Iksander, 1997, "Radiofrequency Radiation Dosimetry Handbook (Fourth Edition)," USAF School of Aerospace Medicine, Brooks Air Force Base.

[GOF (2002)] GSM Operator Forum (GOF), Jan. 2002, "Veiligheidshandboek voor werkzaamheden aan of in de nabijheid van GSM-netwerkinfrastructuur (versie 1.2)".

[Hansen et al. (2000)] P. C. Hansen, M Jacobsen, J. Rasmussen, and H. Sørensen, Jun. 2000, "The PP-TSVD Algorithm for Image Restoration Problems," in P.C. Hansen, B.H. Jacobsen, and K. Mosegaard (Eds.), "Methods and Applications of Inversion," *Lecture Notes in Earth Sciences* 92, Springer, Berlin, pp. 171-186.

[Holma and Toskala (2000)] H. Holma, and A. Toskala, 2000, "WCDMA for UMTS radio acces for Third Generation Mobile Communications," New York, John Wiley & Sons Inc., pp. 74-315.

[ICNIRP (1998)] International Commission on Non-ionizing Radiation Protection, 1998, "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric,magnetic, and electromagnetic fields (up 300 GHz)," *Health Physics*, Vol. 74, No. 4, pp. 494-522.

[Jokela and Puranen, (1998)] K. Jokela, and L. Puranen, Sept. 1998, "Occupational RF exposures," *Radiation protection dosimetry*, Vol. 83, pp. 119-124.

[Joseph et al. (2000)] W. Joseph and L. Martens, Juli – Dec. 2000, Onderzoek naar elektromagnetische velden in de industrie: bronnen, meetprocedures en regelgeving (Federaal Wetenschapsbeleid project NM/02/18), rapport 1: "Inventaris van de elektromagnetische bronnen van RF-straling".

[Joseph et al. (2001a)] W. Joseph and L. Martens, Jan. – Juni 2001, Onderzoek naar elektromagnetische velden in de industrie: bronnen, meetprocedures en regelgeving (Federaal Wetenschapsbeleid project NM/02/18), rapport 2: "Studie van de parameters van de meetprocedure en keuze van de meetprobes".

[Joseph et al. (2001b)] W. Joseph and L. Martens, Juli – Dec. 2001, Onderzoek naar elektromagnetische velden in de industrie: bronnen, meetprocedures en regelgeving (Federaal Wetenschapsbeleid project NM/02/18), rapport 3: "Ontwerp van de meetprocedure voor het geval RF-antennes".

[Joseph et al. (2001c)] W. Joseph and L. Martens, "Calibration of field probes and study of the disturbance on the evaluation of electromagnetic fields", *Proceedings of the 9th URSI Forum 2001*, Louvain-la-Neuve, Belgium, pp. 48, Dec 2001.

[Joseph et al. (2001d)] W. Joseph and L. Martens, "Calibration of and disturbance by electromagnetic field probes", *2nd FTW PHD Symposium, Interactive Poster Session*, Paper 40 (Proceedings available on CD-ROM), Ghent, Belgium, Dec. 2001.

[Joseph et al. (2001e)] W. Joseph and L. Martens, 2002, "A New Method to Determine the Antenna Factor," *IEEE Trans. Instr. Meas.*, *submitted (2001)*.

[Joseph et al. (2002a)] W. Joseph and L. Martens, Jan. – Juni 2002, Onderzoek naar elektromagnetische velden in de industrie: bronnen, meetprocedures en regelgeving (Federaal Wetenschapsbeleid project NM/02/18), rapport 4: “Correcties en toepassing van de meetprocedure op GSM-antennes”.

[Joseph et al. (2002b)] W. Joseph and L. Martens, Juli – Dec. 2002, Onderzoek naar elektromagnetische velden in de industrie: bronnen, meetprocedures en regelgeving (Federaal Wetenschapsbeleid project NM/02/18), rapport 5: “Metingen en simulaties van EM velden, vergelijking tussen veiligheidsafstanden van EM velden en SAR en vergelijking tussen verschillende fantomen”.

[Joseph et al. (2002c)] W. Joseph and L. Martens, June 2002, “The Influence of the Measurement Probe on the Evaluation of Electromagnetic Exposure around a Base Station,” *24th Ann. Meeting of the Bioelectromagnetics Soc*, Quebec, pp. 150 – 152.

[Joseph et al. (2002d)] W. Joseph and L. Martens, Aug. 2002, “A New Antenna Calibration Method and a Selection of a Measurement Probe with Minimal Disturbance and Sufficient Sensitivity for Electromagnetic Exposure Measurements around Wireless Base Stations”, *the 27th triennial General Assembly of the International Union of Radio Science*, Maastricht, paper 1565.

[Joseph et al. (2002e)] W. Joseph, Christof Olivier, and L. Martens, Dec. 2002, “A Robust, Fast and Accurate Deconvolution Algorithm for EM-field Measurements around GSM and UMTS base stations with a spectumanalyser”, *IEEE Trans. Instr. Meas.*, vol 51, no 6, 1163 – 1169.

[Joseph et al. (2003a)] W. Joseph and L. Martens, Jan. – Juni 2003, Onderzoek naar elektromagnetische velden in de industrie: bronnen, meetprocedures en regelgeving (Federaal Wetenschapsbeleid project NM/02/18), rapport 6: “SAR metingen en simulaties”.

[Joseph et al. (2003b)] W. Joseph and L. Martens, May 2003, “The Influence of the Measurement Probe on the Evaluation of Electromagnetic Fields,” *IEEE Trans. Electromag. Compat.*, vol 43, no. 2, pp. 339 – 349.

[Joseph et al. (2003c)] W. Joseph and L. Martens, June 2003, “Comparison of compliance boundaries for occupational exposure of a base station antenna using electromagnetic field and SAR assessment,” *25th Ann. Meeting of the Bioelectromagnetics Soc*, Wailea Maui, pp. 69-70.

[Joseph et al. (2003d)] W. Joseph, L. Verloock, and L. Martens, 12 June 2003, “An Accurate Low-Cost Measurement Technique for Occupational Exposure Assessment of Base Station Antennas,” *IEE Electronics Letters*, vol 39, no 12, pp. 886 - 887.

[Joseph et al. (2003e)] W. Joseph and L. Martens, “New Safety Factor for the Determination of Occupational Exposure by SAR in Phantom Model,” *IEE Electronics Letters*, submitted.

[Kuster and Balzano, (1992)] N. Kuster, and Q. Balzano, Feb. 1992, “Energy absorption mechanism by biological bodies in the near field of dipole antennas above 300 MHz,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 41, pp. 17–23.

[Martens et al. (2002)] L. Martens, C. Olivier, and W. Joseph, May 2002, "First experiences with electromagnetic measurements around UMTS base stations", Presented at the first COST281 Management Committee Meeting and COST281/EBEA Forum in Rome (Workshop Emerging Technologies), Rome, Italy.

[NCHS (2001)] Body weight data from U.S. National Center for Health statistics. <http://www.cdc.gov/nchs/about/major/nhanes/growcharts/charts.htm>

[Nicolas et al. (2001)] E. Nicolas, D. Lautru, M. F. Wong, and J. Wiart, Apr. 2001, "Specific absorption rate assessments based on a selective isotropic measuring system for electromagnetic fields", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 50, pp. 397 – 401.

[Olivier et al. (2001)] C. Olivier, W. Joseph, and L. Martens, 6-8 September 2001, "Preliminary electromagnetic measurements of the exposure around a UMTS base station", Proceedings of the 5th International Congress of the European BioElectromagnetics Association (EBEA 2001), Helsinki, Finland, pp. 120-121.

[Pokovic (1999)] K. Pokovic, 1999, "Advanced electromagnetic probes for near-field evaluations," *dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences*, Swiss federal institute of technology Zurich, Switzerland, Diss. ETH No. 13334.

[Qishan et al. (1999)] Y. Qishan, O. P. Gandhi, M. Aronsson, and D. Wu, Aug. 1999, "An automated SAR measurement system for compliance testing of personal wireless devices," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 41, pp. 234–245.

[SARSYS (2000)] Final Technical Report SARSYS Project, July 1998 - July 2000, "Development of procedures for the assessment of exposure to electromagnetic near-fields from telecommunications equipment," Microwave Consultants Limited (MCL), Great Britain; ITIS Foundation (formerly IFH/ETHZ), Switzerland; Schmid & Partner Engineering AG, Switzerland; INTEC Ghent University, Belgium.

[Smith (1982a)] A. A. Smith, JR, Aug. 1982, "Standard-Site Method for Determining Antenna Factors," *IEEE Trans. Electromag. Compat.*, vol. 24, no. 3, pp. 316-322.

[Smith et al. (1982b)] A. A. Smith, JR, F. German, and B. Pate, Aug. 1982, "Calculation of Site Attenuation from Antenna Factors," *IEEE Trans. Electromag. Compat.*, vol. 24, no. 3, pp. 301-316.

[Tofani et al. (1995)] S. Tofani, G. d'Amore, A. Benedetto, O.P. Ghandi, and J.Y. Chen, Feb. 1995 "Induced Foot-Currents in Humans Exposed to VHF Radio-Frequency EM Fields," *IEEE Trans. Electromag. Compat.*, vol. 37, no. 1, pp. 96-99.

[Vermeeren et al. (2003)] G. Vermeeren and L. Martens, June 2003, "Elliptical Model for Interpolation and Extrapolation of the Global SAR Distribution in a Spherical, Homogeneous Head Phantom," 25th Ann. Meeting of the Bioelectromagnetics Soc, Wailea Maui, pp. 219-220.

[Yagüe et al. (1998)] R. Yagüe, A. Ibars, and L. Martinez, Aug. 1998, "Analysis and Reduction of the Distortions Induced by Time-Domain Filtering Techniques in Network Analyzers," *IEEE Trans. Instr. Meas.*, vol. 47, No. 4, pp. 930-934.

[Yost (1998)] M. Yost, Sept. 1998, "Alternative Magnetic Field Exposure Metrics: Occupational Measurements in Trolley Workers," *Radiation protection dosimetry*, Vol. 83, pp. 99-106.

Uitgegeven in 2005 door het Federaal Wetenschapsbeleid

De wetenschappelijke verantwoordelijkheid over de inhoud van dit eindverslag berust volledig bij de auteurs.

**FEDERAAL
WETENSCHAPSBELEID**

Wetenschapsstraat 8 ■ B-1000 BRUSSEL
Tel. 02 238 34 11 ■ Fax 02 230 59 12
www.belspo.be

