

**Tijdsreeks en GIS-model om de blootstelling van de bevolking
aan het 50 Hz magnetisch veld gegenereerd door bovengrondse
hoogspanningslijnen in Vlaanderen in kaart te brengen**

**Gilbert Decat^a, Eefje Peeters^a, Roger Smolders^a, Myriam Bossuyt^b
^aVito, ^bVMM**

Studie uitgevoerd in opdracht van de Vlaamse Milieumaatschappij, MIRA

2003/IMS/R/117



Vito

September 2003

VERSPREIDINGSLIJST

VMM: 5 exemplaren

Vito: 7 exemplaren

INHOUDSTABEL

SAMENVATTING

WOORD VOORAF

0	INLEIDING	1
1	DEEL 1: TIJDSREEKSEN EN ONTWIKKELING VAN ANALYTISCH MODEL VOOR HET BEREKENEN VAN HET ELEKTRISCH EN MAGNETISCH VELD	3
1.1	Korte beschrijving van de methodiek.....	3
1.1.1	Tijdsreeksen	3
1.1.2	Benadering van het GIS-model.....	3
1.2	Tijdsreeksen.....	4
1.2.1	Doel.....	4
1.2.2	Rekenmethode	5
1.3	Analytisch model voor de berekening van het elektrisch en magnetisch veld.....	8
1.3.1	Doel.....	8
1.3.2	Modelbenadering voor het elektrisch veld	8
1.3.3	Modelbenadering voor het magnetisch veld	13
1.3.4	Samenvatting	16
1.4	Validatie van het analytisch veld.....	17
1.4.1	Doel.....	17
1.4.2	Verificatie van het analytisch model door middel van de methode van de eindige elementen.....	17
1.5	Besluit Deel 1	31
1.5.1	Magnetisch veld.....	31
1.5.2	Elektrisch veld	31
2	DEEL 2: GIS-TOEPASSING OM DE BLOOTSTELLING AAN HET MAGNETISCH VELD VAN LUCHTLIJNEN IN VLAANDEREN IN KAART TE BRENGEN	33
2.1	Doel.....	33
2.2	Digitaliseren van de GIS-kaarten.....	33
2.3	Emissiekaarten van het B-veld per lijntype.....	34
2.3.1	Emissiekaarten voor het B-veld van 70 kV-lijnen	34
2.3.2	Emissiekaarten voor het B-veld van 150 kV-lijnen.....	36
2.3.3	Emissiekaarten voor het B-veld van 380 kV-lijnen.....	37
2.4	Bepaling van de 0,4 μ T drempelafstand.....	39
2.5	Percent inwoners van de regio Vlaanderen blootgesteld aan een B-veld van tenminste 0,4 μ T.....	Error! Bookmark not defined.
2.6	Besluit deel 2	44
3	REFERENTIES.....	45

WOORD VOORAF

Epidemiologisch onderzoek heeft aangetoond dat het relatief risico op leukemie bij kinderen die blootgesteld worden aan een magnetisch veld van meer dan 0,4 μ T tot tweemaal groter kan zijn dan bij kinderen die blootgesteld worden aan minder dan deze drempelwaarden. Alhoewel metingen in Vlaanderen uitgewezen hebben dat deze blootstellingsdrempels zich hoofdzakelijk in de omgeving van hoogspanningslijnen (HSL) bevinden heeft men er geen idee van op welke afstand van de HSL deze drempels voorkomen. Ook kunnen de overheid of andere instanties zich geen beeld vormen van het bevolkingsaandeel (volwassenen en kinderen) dat blootgesteld wordt/werd aan dergelijke velden. Om dit probleem op te lossen wordt in deze studie een model voorgesteld waarmee de grootte van het magnetisch veld op iedere radiale, axiale en verticale afstand van om het even welke luchtlijn HSL op een betrouwbare wijze kan bepaald worden. Om het aandeel van de bevolkingsblootstelling (elektronisch) in kaart te brengen zal dit model optimaal gecombineerd worden met GIS. Door middel van deze benadering en rekening houdende met de geografische spreiding en respectievelijk de lengte van de hoogspanningslijnen zal tevens een inschatting kunnen gemaakt worden van de globale emissiebelasting op regionaal (Vlaanderen), provinciaal en gemeentelijk vlak. Met het oog op de noodwendigheid van historische blootstellingsgegevens ter verklaring van retrospectieve epidemiologische studies enerzijds en het maken van voorspellingen over de emissies en het blootgesteld bevolkingaandeel anderzijds zullen in het algemeen model eveneens regressie-analysen ingebouwd worden die gebaseerd zijn op representatieve en coherente tijdsreeksen van het HSL-park in Vlaanderen. Dit model zal zijn toepassing vinden bij het berekenen van de indicatoren voor de MIRA-T rapporten en kan een aanzet zijn voor de scenario-berekening in de MIRA-S rapportage.

Myriam Bossuyt
VMM

SAMENVATTING

Dit rapport bestaat uit twee delen. In het eerste deel worden in een eerste fase de tijdreeksen (periode 1991 – 2001) van het magnetisch veld berekend voor de 70, 150 en 380 kV-luchtlijnen die Vlaanderen doorkruisen. Dit gebeurt door de geografische lengte van de luchtlijnen in Vlaanderen te vermenigvuldigen met magnetische veldsterkte die berekend werd door middel van het analytisch model dat in de tweede fase van dit deel ontwikkeld werd. Het hoofddoel van de ontwikkeling van het analytisch rekenmodel is het te gebruiken als voornaamste fundament voor de opbouw van een GIS-model waarmee de bevolkingsblootstelling aan het magnetisch veld van de luchtlijnen in Vlaanderen in kaart wordt gebracht. Het GIS-model wordt behandeld in het tweede gedeelte van dit rapport.

Zoals uit het woord vooraf reeds bleek en tevens in de inleiding naar voren wordt geschoven suggereert epidemiologisch onderzoek een hoger relatief risico ($r.r. = 2$) op leukemie bij kinderen tussen 0 en 14 jaar die, door te wonen in de buurt van hoogspanningslijnen, continu worden blootgesteld aan een 50 Hz magnetisch veld van meer dan $0,4 \mu\text{T}$ dan bij hen die blootgesteld worden aan zwakkere veldsterkte. Daar dit probleem zich niet voordoet bij blootstellingen aan het 50 Hz elektrisch veld richt dit rapport zich in de eerste plaats naar de tijdsreeksen en het ontwikkelen van het analytisch model die respectievelijk verband houden met het magnetisch veld. Bovendien werd er, in tegenstelling tot het magnetisch veld, geen overeenkomst gevonden tussen de elektrische veldsterkte bekomen met het “analytisch model” en die bekomen werd met de “eindige elementen methode” en die “in situ” gemeten. Voor die redenen wordt het “analytisch model met betrekking tot het elektrisch veld” (nog) niet opgenomen in het huidige GIS-model dat in deel twee behandeld wordt. De preliminaire berekeningen en de gegevens die hierover in dit rapport vermeld worden zijn aldus louter informatief, tevens vormen ze de aanzet tot eventueel verder onderzoek in dit verband.

Voor wat de resultaten van het magnetisch veld betreft tonen de doorgedreven statistische analyses aan dat er goede overeenkomst bestond tussen het magnetisch veld dat berekend werd met het ontwikkelde analytisch model, dat berekend werd met de eindige elementen methode en last but not least dat op twee verschillende manieren (onder gecontroleerde omstandigheden en “at random”) onder/nabij 70 kV, 150 kV en respectievelijk 380 kV-lijnen in Vlaanderen gemeten werd.

Hieruit werd besloten dat het “analytisch model” een nuttige en nauwkeurig rekenmethode is die kan gebruikt worden als basisinstrument van het GIS-model voor het in kaart brengen van de magnetische veldsterkte gegenereerd door luchtlijnen en waaraan het algemene publiek blootgesteld wordt.

Het GIS-model dat in deel twee van dit rapport aan bod komt is geschikt om in te spelen op de relatie blootstelling, ruimtelijke ordening en volksgezondheid.

0 INLEIDING

In 2001 klasseerde CIRC/IARC. (Centre Internationale de Recherche sur le cancer/International Agency for Research on Cancer) de ELF (extreme low frequency, 30 – 300 Hz) elektromagnetische velden, en in het bijzonder het 50/60 Hz magnetisch veld, van hoogspanningslijnen als mogelijk kankerverwekkend voor de mens. Deze beslissing was in hoofdzaak gebaseerd op de internationale consensus dat epidemiologische studies aantoonde dat kinderen die blootgesteld worden aan een magnetisch veld vanaf een bepaalde blootstellingsdrempel een verhoogd risico lopen op leukemie. Bij een continue blootstelling van kinderen tussen 0 en 14 jaar aan 0,4 microtesla (μT) en meer zou het relatief risico op kinderleukemie tweemaal groter zijn (r.r. = 2) dan bij hen die aan minder dan 0,4 μT blootgesteld worden (Ahlbom et al., 2000). In absolute waarden zou dit een bijkomend risico betekenen van 2 tot 3 kinderleukemies per 100.000 kinderen per jaar. Het is op basis van de resultaten van het epidemiologisch onderzoek dat de Wereldgezondheidsorganisatie (WGO) zeer recent op “the International workshop van 24-26 februari 2003 in Luxemburg” verkondigde dat er voldoende aanwijzingen voorhanden zijn om het “voorzorgsprincipe” op “power frequencies”, waarmee uitsluitend het 50/60 Hz magnetisch veld bedoeld wordt, van hoogspanningslijnen toe te passen (Microwave News, 2003).

In verband met de epidemiologische bevindingen moet er echter op gewezen worden dat geen oorzakelijk verband tussen blootstellingen aan de 50/60 Hz magnetische velden van hoogspanningslijnen en kinderleukemie gevonden werd (CSTEE, 2002).

Het Vlaams Gewest is een dichtbevolkt gebied [(5 972 781 inwoners op een oppervlakte van 13 522 km² = 442 inwoners/km²) (NIS-INS, 2002) waar een dichtbedraad hoogspanningsnet loopt. Volgens Elia (Jaarverslag 2002 & <http://www.elia.be>) bedraagt de geografische lengte van het Belgisch hoogspanningsnet 8 181 km. Hiervan gebeurt het stroomtransport van producent naar verbruiker voor 69% (5 604 km) via luchtlijnen en voor 31% (2 577 km) via ondergrondse kabels. Het net bestaat uit een 800-tal hoogspanningsposten (Elia-folder, 2003). Volgens schatting zou het hoogspanningsnet in Vlaanderen 56% van het Belgisch hoogspanningsnet bedragen (MIRA-T 2001). Dit houdt in dat in het Vlaams Gewest respectievelijk ongeveer 3 138 km luchtlijn en 1 443 km ondergrondse hoogspanningskabels lopen: uitgedrukt in oppervlakedichtheid komt dit overeen met respectievelijk ongeveer 100 m/km² luchtlijn en 25 m/km² ondergronds kabel. De hoogspanningslijnen die in Vlaanderen voorkomen, en tot dewelke dit rapport zich beperkt, worden gekenmerkt door een nominale spanning van 70, 150 en 380 kilovolt (kV). Bovenop deze lijnen komt in Wallonië nog de 220 kV-lijn voor.

Ofschoon “CIRC/IARC” het 50/60 Hz als “mogelijk kankerverwekkend” klasseerde, de “WGO” de toepassing van het voorzorgsprincipe verkondigt en Vlaanderen een dichtbevolkt gewest is met een dichtbekabeld hoogspanningsnet, beschikt de overheid over geen enkel instrument dat aantoonde of bepaalde beslissingen inzake preventie en bescherming van de bevolking tegen overdreven blootstelling aan magnetische velden van hoogspanningslijnen al dan niet moeten overwogen of ten uitvoer gebracht worden.

Om dit tekort weg te werken gaf VMM aan Vito de opdracht een GIS (Geografisch Informatiesysteem) model te ontwikkelen om het elektrisch en magnetisch veld die door de

luchtlijnen in Vlaanderen gegenereerd worden in kaart te brengen en om zo in te spelen op de relatie blootstelling, ruimtelijke ordening en volksgezondheid.

Voor de opbouw van de tijdsreeksen wordt uitgegaan van de geografische lengte van de hoogspanningslijnen en de sterkte van het magnetisch veld dat respectievelijk onder bepaalde lijnbelastingen in tijd en ruimte geproduceerd worden. De opbouw van het GIS-model vertrekt vanuit een analytisch model waarmee de grootte van het elektrisch en respectievelijk het magnetisch veld in functie van de lijnparameters (effectieve spanning en stroom enz.) en het reliëf (hoogte geleiders) in ruimte en tijd berekend wordt. De resultaten die bekomen worden met het analytisch model worden gekalibreerd/gevalideerd ten opzichte van:

de resultaten bekomen met methode van de eindige elementen
hiervoor specifiek uitgevoerde “*in situ*” metingen onder luchtlijnen
meetgegevens van een meetcampagne die onder/nabij luchtlijnen in Vlaanderen uitgevoerd werd.

De overeenkomst (goodness of fit) tussen de resultaten van het analytisch model, die van de eindige elementenmethode en die “*in situ*” gemeten werden wordt statistisch bepaald.

Voor alle duidelijkheid wijzen wij erop dat de tijdreeksen en het GIS-model zich uitsluitend beperken tot de luchtlijnen in Vlaanderen en dat deze resultaten niet naar ondergrondse hoogspanningskabels kunnen geëxtrapoleerd worden. Bovendien is het GIS-model van het elektrisch veld minder belangrijk voor de link tussen blootstelling, ruimtelijke ordening en volksgezondheid dan dat van het magnetisch veld omdat:

de gezondheidsschade gesuggereerd in het epidemiologisch onderzoek gerelateerd is aan het 50/60 Hz magnetisch veld en niet aan het elektrisch veld
het elektrisch veld in tegenstelling tot het magnetisch veld gemakkelijk hetzij volledig geblokkeerd hetzij sterk verzwakt wordt door allerlei hindernissen zoals bijvoorbeeld struikgewas, bomen, muren enz..

het correct meten van het 50/60 Hz elektrisch veld slechts kan gebeuren in open vrije ruimtes waar de hindernis zich minimaal bevindt op een afstand van 5 m van de meetsonde. Indien deze voorwaarde niet opgaat, wat vaak het geval is bij “indoormetingen” wordt het meetresultaat nefast beïnvloed door het zogenaamde schaduweffect (Decat, 1993).

Het rapport wordt opgesplitst in twee grote delen. Deel 1 omvat al hetgeen wat de tijdreeksen en het ontwikkelen van het analytisch model betreft. In deel 2 wordt al wat met de GIS-toepassing te maken heeft ondergebracht.

1 DEEL 1: TIJDSREEKSEN EN ONTWIKKELING VAN ANALYTISCH MODEL VOOR HET BEREKENEN VAN HET ELEKTRISCH EN MAGNETISCH VELD

1.1 Korte beschrijving van de methodiek

1.1.1 Tijdreeksen

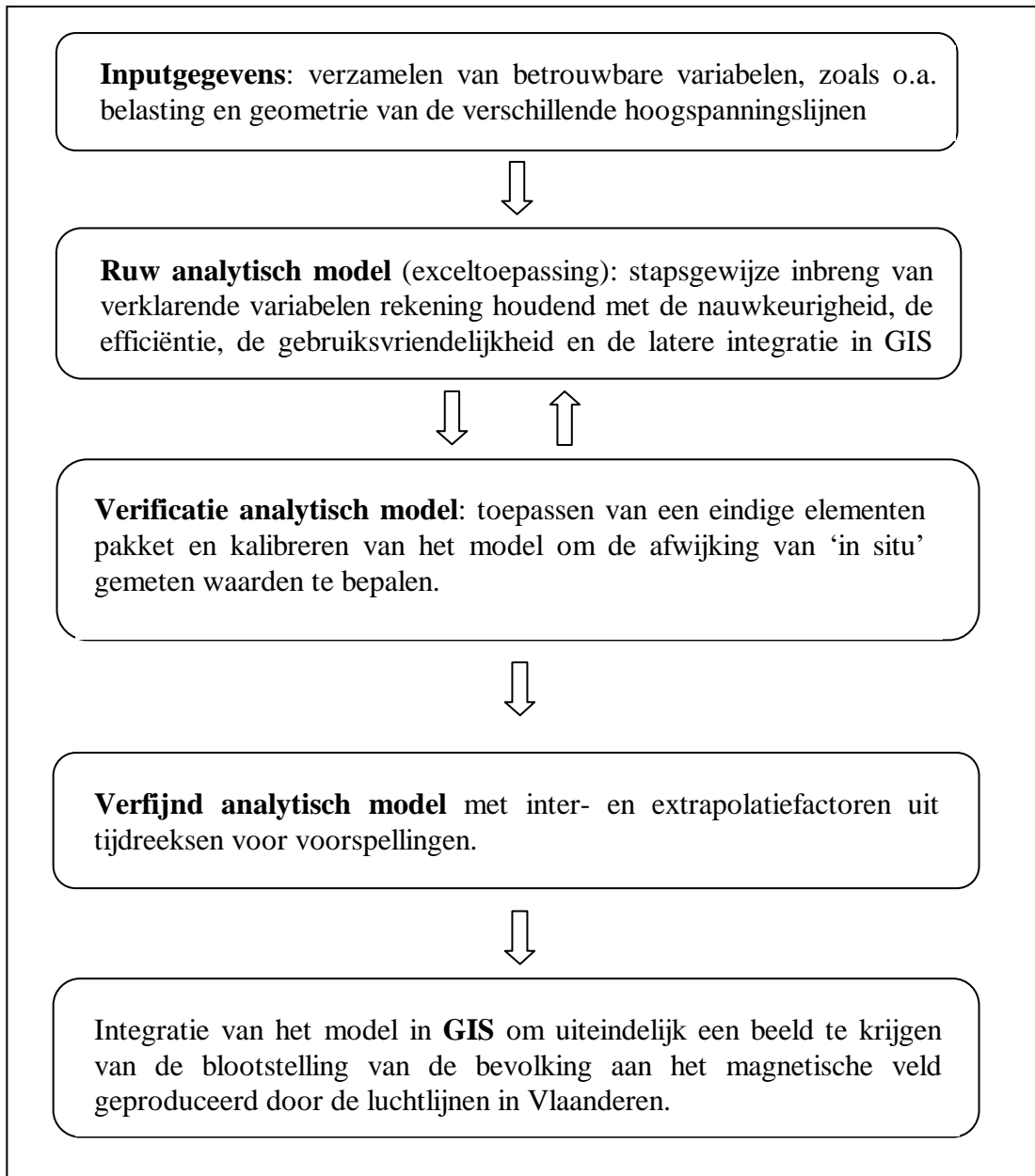
Voor het opstellen van de tijdreeksen wordt uitgegaan van het product van de geografische lengte van de luchtlijnen in Vlaanderen en de gemiddelde sterkte van het magnetisch veld per type hoogspanningslijn. De luchtlijnen waarvoor de tijdreeksen opgesteld worden hebben respectievelijk een nominaal vermogen van 70, 150 en 380 kV. De tijdreeksen lopen over de periode 1991 – 2002 en worden uitgedrukt in “microtesla.kilometer ($\mu\text{T.km}$)” voor wat de emissiebelasting van het magnetisch veld betreft. De totale emissie van de respectievelijke velden wordt bekomen door de som te maken van de emissiebelastingen van de drie betrokken lijntypes. Teneinde emissie- en blootstellingsvoorspellingen te doen bij uitbreiding of inkrimping van het luchtlijnpark kunnen de resultaten van de tijdreeksen in het GIS-model geïntegreerd worden.

In hoofdstuk 2 wordt dieper ingegaan op het doel, de rekenmethode en de resultaten van de tijdreeksen.

1.1.2 Benadering van het GIS-model

Uitgaande van een nulmodel, dat alleen de ongecorrleerde responsvariabele (het elektrisch of magnetisch veld) omvat, zal een ruw analytisch model (RAM) uitgewerkt worden. Hiervoor worden aan het RAM stapsgewijs verklarende variabelen (lijnparameters, spanning, stroom, reliëf enz.) toegevoegd zodat de “beste estimator” van de sterkte van het elektrisch en respectievelijk het magnetisch veld berekend wordt. Daarna worden de respectievelijk berekende veldsterktes op nauwkeurigheid en toepasbaarheid geverifieerd door toepassing van de “eindige elementen methode” enerzijds en ‘*in situ*’ metingen van het elektrisch en magnetisch veld anderzijds. Door herhaling van deze stappen (iteratieproces) wordt het best passende analytisch model (BPAM) bepaald dat bovendien gebruiksvriendelijk en voorspellingsgericht moet zijn. Het BPAM dient als uitgangspunt voor het uitwerken van een optimaal GIS-model waarbij de bevolkingsblootstelling in kaart kan gebracht worden. Het GIS-model zal ingekleurde digitale kaarten van het magnetisch veld bevatten waarin Vlaanderen bestaat uit zones waarvan de kleur overeenkomt met de sterkte van het magnetisch veld.

Figuur 1 geeft een schematisch overzicht van de manier waarop het GIS-model uitgewerkt wordt.



Figuur 1: Schema van de benaderingsmethode van het GIS-model

1.2 Tijdsreeksen

1.2.1 Doel

Het doel van de tijdsreeksen is na te gaan hoe sterk de globale emissie van het elektrisch en magnetisch veld van de luchtlijnen in Vlaanderen toe- of afneemt binnen een bepaalde periode. Aan de hand van recente gegevens waarover we konden beschikken kan de schommeling van veldbelasting berekend worden over een periode van 10 jaar nl. van 1991 tot en met 2002.

1.2.2 Rekenmethode

a. Berekening geografische lengte van luchtlijnen in Vlaanderen

Voor het opstellen van de tijdsreeksen wordt de geografische lengte van de luchtlijnen in Vlaanderen gekoppeld aan de sterkte van het magnetisch veld dat door deze lijnen respectievelijk geproduceerd worden. Tabel 1 toont het tijdsverloop van de geografische lengte van de luchtlijnen in Vlaanderen en dit voor de periode 1991 - 2002.

Tabel 1: Tijdsverloop van geografische lengte (km) luchtlijnen in Vlaanderen

Lijn (kV)	91	92	93	94	95	96	97	98	99	2000	2001	2002
70	1723	1594	1650	1575	1571	1555	1556	1552	1547	1544	1375	1369
150	1115	1133	1137	1124	1124	1124	1122	1123	1123	1123	1123	1124
380	478	478	478	495	495	495	494	494	494	494	494	494

Daar de geografische lengte van het hoogspanningsnet in Vlaanderen naar schatting 56% van dat van België bedraagt (MIRA-T 2001) werd de geografische lengte luchtlijnen in Vlaanderen volgens deze verdeelsleutel (formule 1) van het Belgisch hoogspanningsnet ((Elia, 2002), <http://www.elia.be>) afgeleid.

$$\text{Formule 1: } GLV_{(km)} = GLB \times \frac{56}{100}$$

waar:

GLV = geografische lengte van luchtlijnen in Vlaanderen

GLB = geografische lengte van luchtlijnen in België

b. Berekening van de tijdsreeksen

- *Werkingscapaciteit en stroombelasting van de betrokken luchtlijnen*

Tabel 2 geeft een overzicht van het percent van de tijd dat een bepaalde lijn aan een bepaald percentage van haar maximale capaciteit (werkingscapaciteit of wkc) werkt.

Tabel 2: Werkingscapaciteit van de verschillende lijnen

Klasse-interval	Werkingscapaciteit van de lijn in %			
	0 < wkc < 25	25 < wkc < 50	50 < wkc < 75	75 < wkc < 100
Klassemidden	12,5%	37,5%	62,5%	87,5%
Lijntype				
70 kV	30,5 ± 28,5	51,5 ± 20	16,5 ± 17	1 ± 0,9
150 kV	0,66 ± 0	44,5 ± 0	50,5 ± 0	4,5 ± 0
380 kV	28 ± 25,5	28,5 ± 16,5	36 ± 22,5	7,5 ± 10
Gemiddeld	19,75 ± 16,5	41,5 ± 12,02	34,34 ± 17	4,41 ± 3,5

Bron: berekend uit niet-gepubliceerde gegevens van Elia (Elia, 2003b)

Bijvoorbeeld: de 70 kV-lijn werkt voor 30,5% van de tijd aan een werkingscapaciteit (wkc) tussen 0 en 25%, voor 51,5% van de tijd aan een wkc tussen 25 en 50%, voor 16,5% tussen 50 en 75% en voor 1% van de tijd aan een wkc tussen 75 en 100%. Het klassemidden (onderste + bovenste klasse gedeeld door 2) is representatief voor heel het klasse-interval (bv. een wkc van 12,5% is representatief voor de wkc percentages tussen 0 en 25%).

Tabel 3 geeft een overzicht van de stroom berekend in functie van de werkingscapaciteit van de lijn. Deze stroom wordt bekomen door het klassemidden (in %) per lijntype van tabel 2 te vermenigvuldigen met de gemiddelde maximale stroom (Gemmax) van tabel 3 die per lijntype over één jaar in de periode 2000 – 2001 gemeten werd (Elia, 2002a).

Tabel 3: Stroom (A) in functie van de werkingscapaciteit van de lijn

Lijntype	Stroom (A) i.f.v. werkingscapaciteit van de lijn (%)				
	0 – 25%	25 – 50%	50 -75%	75 – 100%	Gemmax ± stdev
70 kV	36,91 A	111 A	184,5 A	258,5 A	(295,27 ± 119)A
150 kV	49,2 A	147,5 A	246 A	344,5 A	(393 ± 0)A
380 kV	127,33 A	382 A	636,5 A	891,5 A	(1018 ± 361,5)A

- *Verloop van emissiebelasting van het magnetisch veld*

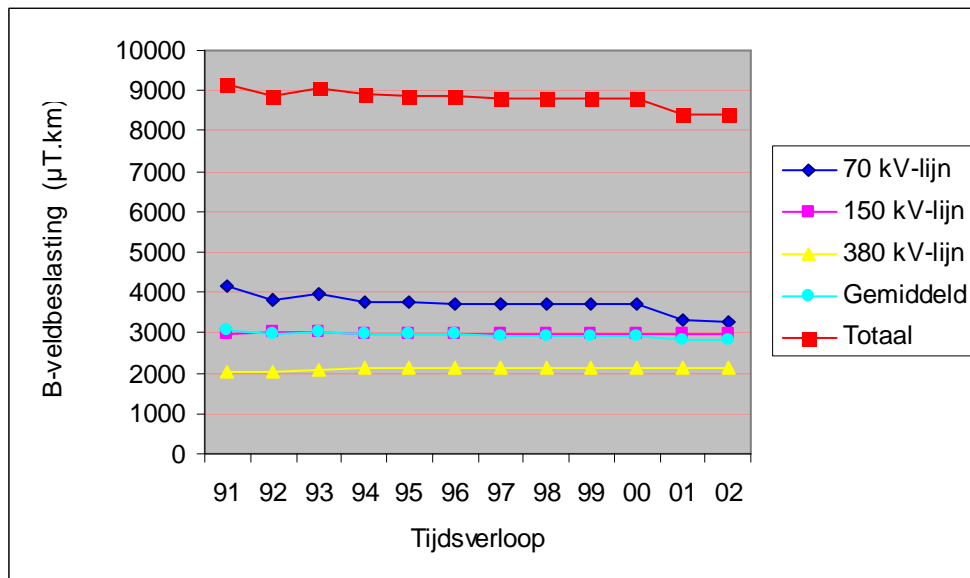
Tabel 4 geeft de waarden van het magnetisch inductieveld (B-veld) die uitgaande van de stroombelasting per wkc (tabel 3) met het analytisch model (zie hoofdstuk 3 voor methode) berekend werd. Bij de berekening werd rekening gehouden met de wettelijk minimale hoogte dat de grootste doorbuiging van onderste geleider van de lijn boven het maaiveld moet hangen (Elia, 2003c). In tabel 4 (lijnhoogte) wordt o.a. deze hoogte gegeven voor de verschillende lijntypes.

Tabel 4: B-veld (μT) bij verschillende werkingscapaciteiten en lijnhoogtes

Lijntype	Lijnhoogte (m)	Werkingscapaciteit van de lijn (%)				Gemiddeld
		0 – 25 (12,5)	25 – 50 (37,5)	50 -75 (62,5)	75 – 100 (87,5)	
70 kV	6,2	0,6 μT	1,8 μT	3 μT	4,2 μT	2,40 μT
150 kV	7	0,7 μT	2 μT	3,5 μT	4,5 μT	2,68 μT
380 kV	9,3	1 μT	3 μT	5,5 μT	7,5 μT	4,25 μT
<i>Gemiddeld</i>		<i>0,8 μT</i>	<i>2,3 μT</i>	<i>4,0 μT</i>	<i>5,4 μT</i>	<i>3,1 μT</i>

Het B-veld werd telkens berekend voor een blootstelling op een hoogte van 1,5 m boven het maaiveld en dit loodrecht onder de grootste doorbuiging (spanmidden) van de onderste geleider van de lijn. Voorbeeld: bij de 70 kV-lijn van tabel 4 waar de minimale afstand tussen maaiveld en spanmidden van de onderste geleider 6,2 m moet bedragen is de sterkte van het B-veld die op een hoogte van 1,5 m boven het maaiveld berekend werd bij een werkingscapaciteit tussen 0 en 25% gelijk aan 0,6 μT .

De berekening van de tijdsreeksen voor de sterkte van het B-veld gebeurt door de geografische lengte (km) van de luchtlijnen per jaar in Vlaanderen (tabel 1) te vermenigvuldigen met de gemiddelde waarden van het B-veld per lijntype van de laatste kolom van tabel 4. Figuur 2 illustreert het verloop van de emissiebelasting van het B-veld ($\mu\text{T.km}$) voor de drie luchtlijntypes (70, 150 en 380 kV) in Vlaanderen. Tevens wordt de gemiddelde en het totaal van de emissiebelastingen weergegeven.



Figuur 2: Emissiebelasting van het B-veld voor de luchtlijnen in Vlaanderen

Aangezien het verloop van de geografische lengte van de 150 en de 380 kV-lijnen vrij constant blijft (tabel 1) is het verloop van de B-veldemissie eveneens constant. Daar men sedert enige tijd meer opteert voor een ondergronds plaatsing van de 70 kV-lijnen, daalt de B-veldemissie van dit lijntype tussen 2000 en 2002 met ongeveer $420 \mu\text{T.km}$. Hierdoor neemt de totale emissiebelasting af van $8800 \mu\text{T.km}$ tot $8391 \mu\text{T.km}$.

Het verloop van de emissiebelasting van het elektrisch veld (uitgedrukt in V/m.km) zou op dezelfde manier als die van het B-veld kunnen berekend worden. Aangezien het enerzijds de effectieve spanning waarvan de grootte van het elektrisch veld afhangt maar weinig of niet schommelt zal het verloop van de emissiebelasting van jaar tot jaar uitsluitend afhangen van de geografische lengte van het luchtlijnennet. Een tweede reden waarom het verloop van de emissiebelasting van het E-veld niet uitgezet werd is dat de resultaten van het analytisch model te sterk afweken van deze bekomen met het eindige elementen pakket en van grootte van het E-veld dat in situ gemeten werd.

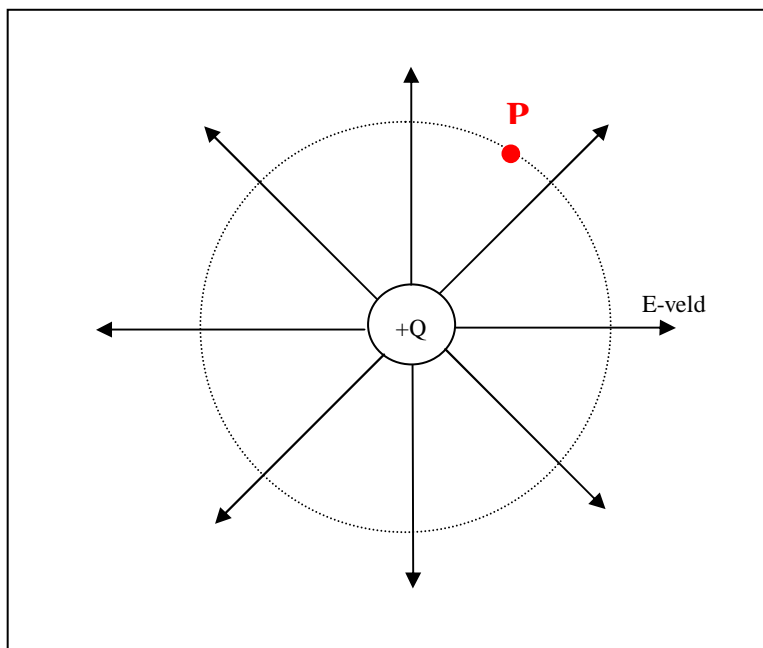
1.3 Analytisch model voor de berekening van het elektrisch en magnetisch veld

1.3.1 Doel

Aan de hand van een analytisch model (AM) worden respectievelijk de elektrische en magnetische veldsterkten berekend. Deze berekeningen moeten als basis dienen voor de opbouw van het GIS-model om de blootstelling van de algemene bevolking in kaart te brengen.

1.3.2 Modelbenadering voor het elektrisch veld

Indien een lange geleider zich in een uniform medium zoals lucht bevindt, en een uniforme lading bezit over zijn volledige lengte, en bovendien geïsoleerd is t.o.v. andere ladingen zodat de lading uniform verdeeld is over zijn omtrek, is het elektrische veld radiaal gericht. Figuur 3 geeft een beeld van de elektrische veldsterkte (E) veroorzaakt door een lading (Q) van een rechte geleider (cfr. luchtlijn of ondergrondse kabel).



Figuur 3: Elektrisch veld van een rechte geleider

Alle punten op eenzelfde afstand van de geleider gelegen, vormen dan een equipotentiaal oppervlak. Het elektrische veld in punt P op een afstand r van de geleider wordt dan bekomen door de stelling van Gauss toe te passen:

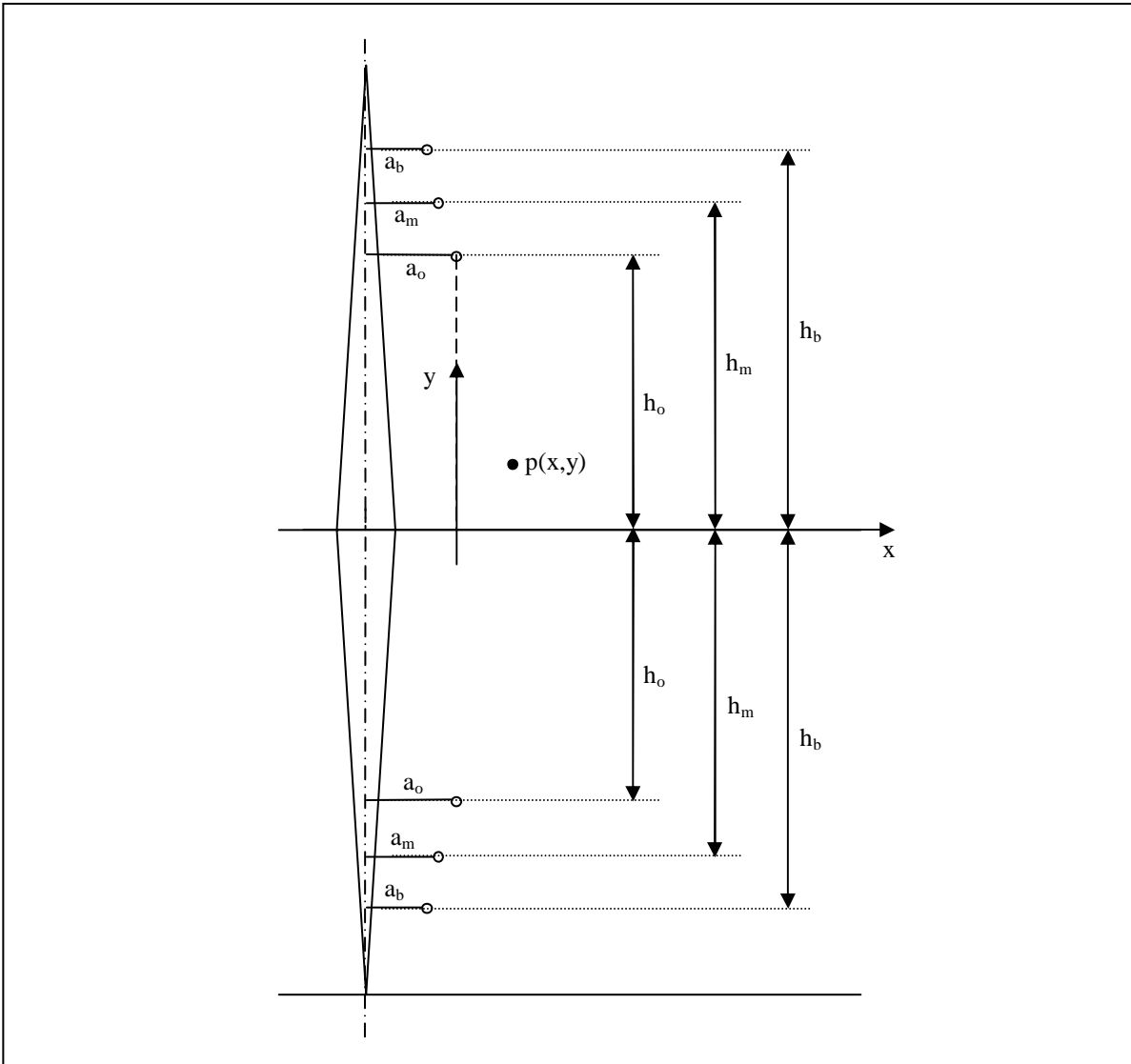
$$\text{Formule 2} \quad E = \frac{Q}{2\pi r \epsilon_0}$$

Waar:

- ϵ_0 = permittiviteit van vacuüm en bij benadering van lucht = $8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m

De permittiviteit van een andere stof dan vacuüm wordt bekomen door ϵ_0 te vermenigvuldigen met de relatieve permittiviteit van die bepaalde middenstof ($\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$), die aangeeft hoeveel keer de permittiviteit van een bepaalde middenstof groter of kleiner is dan die van het luchtledige ($\epsilon_{r,\text{lucht}} = 1,0006$).

In de meeste praktische gevallen is de afstand tussen de 3 fasen van een hoogspanningslijn enerzijds en de grond anderzijds van dezelfde orde van grootte. Dit betekent dat er bij de analytische berekening van de elektrische veldsterkte rekening gehouden moet worden met de invloed van de grond. Vermits de aarde een equipotentiaaloppervlak is (spanning $U = 0$ V), kan de invloed van de aarde bepaald worden door gebruik te maken van beeldladingen. Deze beeldladingen hebben dezelfde grootte als de fysische ladingen van de werkelijke hoogspanningslijnen maar zijn tegengesteld van teken, en worden even ver onder het grondoppervlak geplaatst als de werkelijke ladingen boven het grondoppervlak. Figuur 4 geeft een configuratie weer van een hoogspanningsmast met een hoogspanningslijn aan één zijde van de mast die gebruikt wordt voor de berekening van de elektrische veldsterkte in punt p ten gevolge van de aanwezigheid van de hoogspanningslijn.



Figuur 4: Configuratie van een hoogspanningsmast met een hoogspanningslijn aan één zijde van de mast

De hoogtes van de 3 fasen van de lijn en de afstanden tot het midden van de mast worden respectievelijk weergegeven door de parameters h_i en a_i . Hierbij komt i overeen met o (onderste fase), m (middelste fase) of b (bovenste fase). Het punt p waarin de elektrische veldsterkte bepaald moet worden, wordt gekarakteriseerd door een x en een y coördinaat, waarbij de y -waarde de hoogte boven het maaiveld en de x -waarde de horizontale afstand vanaf de onderste fase van de lijn weergeeft. Tabel 5 geeft de h en a waarden weer voor de verschillende luchtlijntypes.

Tabel 5: Hoogtes (h) en horizontale afstanden van de hoogspanningsmast (a) voor de verschillende fasen van de drie luchtlijnen (Elia, 2003d)

Afmetingen (m)	380 kV	150 kV	70 kV
a_o	7,9	4	2,75
a_m	7,4	3,5	2,75
a_b	7,1	3	2,75
h_o	9,3	7	6,2
h_m	18,3	12	10,2
h_b	27,3	17	14,2

Voor de hoogte van de lijn boven het maaiveld, werd telkens de grootste doorbuiging (spanmidden) van de geleiders verondersteld. Hierdoor zal steeds de maximale waarde van de veldsterkte worden berekend.

Om de elektrische veldsterkte in een punt p te berekenen, wordt de vectoriële som gemaakt van de E-velden veroorzaakt in punt p door de ladingen van de respectievelijke geleiders en hun beeldladingen (voor 1 geleider, zie formule 2). De elektrische veldsterkte in punt p wordt dan berekend met behulp van formule 3:

$$\begin{aligned}
 \vec{E}_p &= \vec{E}_{p,o} + \vec{E}_{p,m} + \vec{E}_{p,b} + \vec{E}_{p,ob} + \vec{E}_{p,mb} + \vec{E}_{p,bb} \\
 E_{p,x} &= E_{p,o,x} + E_{p,m,x} + E_{p,b,x} + E_{p,ob,x} + E_{p,mb,x} + E_{p,bb,x} \\
 E_{p,y} &= E_{p,o,y} + E_{p,m,y} + E_{p,b,y} + E_{p,ob,y} + E_{p,mb,y} + E_{p,bb,y} \\
 E_p &= \sqrt{E_{p,x}^2 + E_{p,y}^2}
 \end{aligned}$$

Formule 3

Hierin slaat de extra index b ($E_{p,ob}$, $E_{p,mb}$, $E_{p,bb}$) op de beeldladingen en gelden de volgende relaties voor $i = o, m$ en b :

$$\begin{aligned}
 E_{p,i,x} &= E_{p,i} * \cos \beta_i \\
 E_{p,i,y} &= E_{p,i} * \sin \beta_i \\
 E_{p,i} &= \frac{q_i}{2 * \pi * \epsilon_0 * D_{ip}} \\
 D_{ip} &= \sqrt{(x + a_o - a_i)^2 + (h_i - y)^2} \\
 \beta_i &= \text{bgtg} \left(\frac{h_i - y}{x + a_o - a_i} \right)
 \end{aligned}$$

Formule 4

met:

D_{ip} : afstand tussen de onderste, middelste of bovenste fase van de lijn en p

q_i : de lading van fase i van de lijn

Voor de beeldladingen (i= ob, mb en bb) gelden de volgende formules:

$$\begin{aligned}
 E_{p,ib,x} &= E_{p,ib} * \cos \beta_{ib} \\
 E_{p,ib,y} &= E_{p,ib} * \sin \beta_{ib} \\
 \text{Formule 5} \quad E_{p,ib} &= \frac{-q_i}{2 * \pi * \epsilon_0 * D_{ib,p}} \\
 D_{ib,p} &= \sqrt{(x + a_o - a_i)^2 + (h_i + y)^2} \\
 \beta_{ib} &= \text{bgtg} \left(\frac{h_i + y}{x + a_o - a_i} \right)
 \end{aligned}$$

met:

$D_{ib,p}$: afstand tussen de onderste, middelste of bovenste fase van de beeldlading en p

De enige resterende onbekende parameters in de formules 3, 4 en 5 zijn de ladingen van de verschillende fasen van de lijn, nl. q_o , q_m en q_b . Deze ladingen worden berekend uit de volgende matrixvergelijking (Van Dommelen D., 1994):

$$\text{Formule 6} \quad \begin{bmatrix} V_o \\ V_m \\ V_b \end{bmatrix} = \frac{-1}{2 * \pi * \epsilon_0} * \begin{bmatrix} \ln \frac{r_o}{2h_o} \ln \frac{D_{om}}{D_{om'}} \ln \frac{D_{ob}}{D_{ob'}} \\ \ln \frac{D_{mo}}{D_{mo'}} \ln \frac{r_m}{2h_m} \ln \frac{D_{mb}}{D_{mb'}} \\ \ln \frac{D_{bo}}{D_{bo'}} \ln \frac{D_{bm}}{D_{bm'}} \ln \frac{r_b}{2h_b} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} q_o \\ q_m \\ q_b \end{bmatrix}$$

met:

V_o : amplitude van de spanning van de onderste fase van de lijn

V_m en V_b : waarde van de spanning van de middelste en bovenste fase van de lijn op het moment dat de spanning van de onderste fase zijn maximale waarde (amplitude) bereikt

r_i : straal van de geleider van de onderste, middelste of bovenste fase

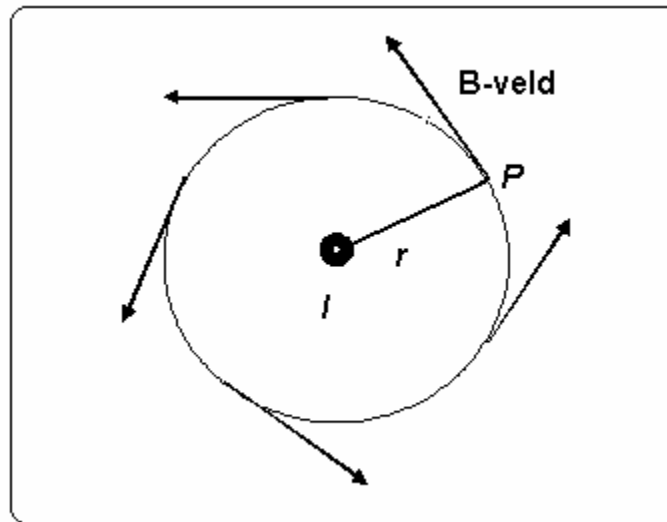
D_{ij} : afstand tussen fase i en j van de lijn

D_{ij} : afstand tussen fase i van de lijn en fase j van de beeldlijn

Volgens deze formules wordt de grootste waarde van het elektrisch veld berekend die in punt p kan voorkomen. E wordt namelijk berekend op het ogenblik dat de spanning in de onderste fase maximaal is (zijn amplitude bereikt) en dus het E-veld onder de lijn eveneens maximaal is.

1.3.3 Modelbenadering voor het magnetisch veld

Figuur 5 illustreert de magnetische fluxdichtheid of het magnetisch inductieveld (B-veld) van een stroom (I) doorheen een rechte geleider (cfr. luchtleijn of ondergrondse kabel). Komt de stroom vanuit het scherm of papier naar ons toe verkrijgt men het beeld van figuur 5. De zin van de krachtlijnen van het B-veld kunnen bepaald worden aan de hand van de kurkentrekkerregel (of de rechterhandregel).



Figuur 5: Magnetisch inductieveld van een rechte geleider

Schroeft men een kurkentrekker in de zin van de stroom dan wordt de zin van het B-veld gegeven door de draaizin van de kurkentrekker.

De grootte van het B-veld wordt in het punt (P) op een afstand (r) van de geleider gegeven door:

$$\text{Formule 7} \quad B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

met:

μ_0 = permeabiliteit of het doordringvermogen van de magnetische flux in het luchtledige en in lucht en die gelijk is aan: $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m} = 12,57 \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$.

I = stroom (kA) per fase

$2\pi r$ = cirkelomtrek

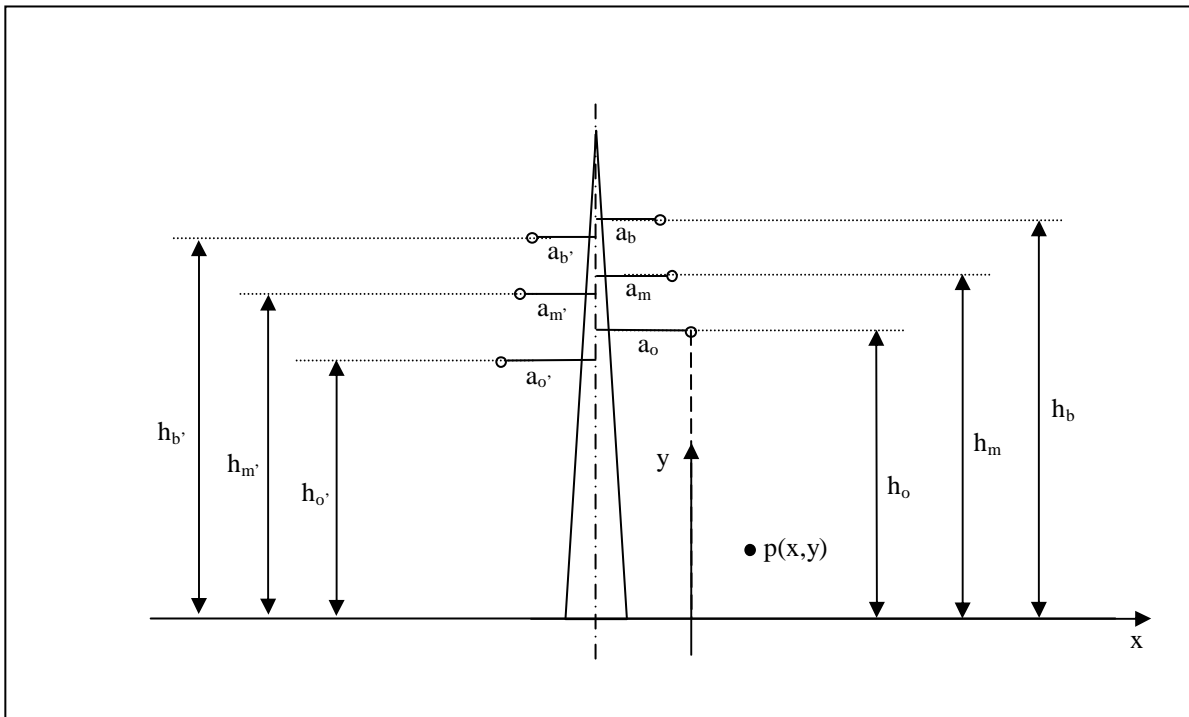
De permeabiliteit van een andere stof dan lucht wordt bekomen door μ_0 te vermenigvuldigen met de relatieve permeabiliteit van die bepaalde middenstof ($\mu = \mu_0 \mu_r$), die aangeeft hoeveel keer de permeabiliteit van een bepaalde middenstof groter of kleiner is dan die van het luchtledige.

In tegenstelling tot de berekening van het elektrisch veld, moet voor de berekening van het magnetisch veld geen rekening gehouden worden met de invloed van de aarde, omdat deze verwaarloosbaar is voor de verdeling van het magnetisch veld rond de geleiders. De reden hiervoor is tweevoudig:

De relatieve permeabiliteit van de aarde is ongeveer gelijk aan 1 (zoals voor lucht), wat betekent dat de aarde als het fysische vervolg van de lucht beschouwd kan worden (m.a.w. de veldlijnen lopen gewoon door);

De elektrische geleidbaarheid van de aarde is klein, zodat de stromen die in de aarde geïnduceerd worden zo klein zijn dat hun effect op het magnetisch veld te verwaarlozen is.

Figuur 6 geeft een beeld van een hoogspanningsmast met aan beide mastarmen een luchtlijn. Tevens zijn in deze figuur de lijnparameters opgenomen die gebruikt worden in de ontwikkeling van het analytisch model.



Figuur 6: Parameters van een hoogspanningsmast met aan beide zijden een luchtlijn

De hoogtes van de drie fasen van beide lijnen en de afstanden tot het midden van de mast worden respectievelijk weergegeven door de parameters h_i , h_i' , a_i en a_i' . Hierbij komt i overeen met o (onderste fase), m (middelste fase) of b (bovenste fase). Het punt p waarin de veldsterkte bepaald moet worden, wordt gekarakteriseerd door een x en een y coördinaat, waarbij de y -waarde de hoogte boven het maaiveld en de x -waarde de horizontale afstand vanaf de onderste fase van de referentielijn weergeeft. De referentielijn wordt bepaald door h_i en a_i , terwijl de andere lijn wordt gekenmerkt door h_i' en a_i' . Tabel 5 op p. 15 geeft de h - en a -waarden weer voor de verschillende types hoogspanningslijnen.

Voor de hoogte van de lijn boven het maaiveld, werd telkens de grootste doorbuiging (spanmidden) van de geleiders verondersteld. Hierdoor zal steeds de maximale waarde van de magnetische veldsterkte worden berekend.

Vermits een hoogspanningslijn bestaat uit drie fasen, en dus uit drie geleiders (of 6 indien er 2 geleiders per fase voorkomen, wat meestal het geval is bij de 380 kV-lijnen), bekomt men de magnetische veldsterkte in een punt p door een vectoriële som van de B-velden veroorzaakt in punt p door de respectievelijke geleiders (voor één geleider, zie formule 7). De magnetische veldsterkte in punt p wordt dan berekend met behulp van de volgende formule 8:

$$\begin{aligned}
 \vec{B}_p &= \vec{B}_{p,o} + \vec{B}_{p,m} + \vec{B}_{p,b} + \vec{B}_{p,o'} + \vec{B}_{p,m'} + \vec{B}_{p,b'} \\
 B_{p,x} &= B_{p,o,x} + B_{p,m,x} + B_{p,b,x} + B_{p,o',x} + B_{p,m',x} + B_{p,b',x} \\
 B_{p,y} &= B_{p,o,y} + B_{p,m,y} + B_{p,b,y} + B_{p,o',y} + B_{p,m',y} + B_{p,b',y} \\
 B_p &= \sqrt{B_{p,x}^2 + B_{p,y}^2}
 \end{aligned}$$

Formule 8

Hierbij geldt voor de referentielijn (lijn waarvoor het nulpunt van de x-as loodrecht onder de onderste fase van de lijn ligt, dus $i = o, m$ of b):

$$\begin{aligned}
 B_{p,i,x} &= B_{p,i} * \sin \beta_i \\
 B_{p,i,y} &= B_{p,i} * \cos \beta_i \\
 B_{p,i} &= \frac{\mu_0 * I_i}{2 * \pi * r_i} \\
 r_i &= \sqrt{(x + a_o - a_i)^2 + (h_i - y)^2} \\
 I_o &= \sqrt{2} * wkc * I_{wkc=100\%} \\
 I_b &= I_m = -\frac{I_o}{2} \\
 \beta_i &= 90^\circ - \text{bgtg} \left(\frac{x + a_o - a_i}{h_i - y} \right)
 \end{aligned}$$

Formule 9

met:

- r_i : afstand tussen de onderste, middelste of bovenste fase van de referentielijn en p
- wkc: werkingscapaciteit van de referentielijn
- I_o : amplitude van de stroom door de onderste fase van de referentielijn
- I_m en I_b : waarde van de lijnstroom door de middelste en bovenste fase van de referentielijn op het moment dat de stroom door de onderste fase zijn maximale waarde (amplitude) bereikt

$I_{wkc=100\%}$: de effectieve lijnstroom van de referentielijn bij een maximale belasting van deze lijn. Deze waarde wordt berekend uit de niet-gepubliceerde gegevens over de lijnbelastingen voor de periode van 1 jaar (2000-2001) van Elia (Elia (2003a))

En voor de lijn aan de andere zijde van de mast ($i' = o', m' \text{ of } b'$):

$$\begin{aligned}
 B_{p,i',x} &= B_{p,i'} * \sin \beta_{i'} \\
 B_{p,i',y} &= B_{p,i'} * \cos \beta_{i'} \\
 B_{p,i'} &= \frac{\mu_0 * I_{i'}}{2 * \pi * r_{i'}} \\
 \text{Formule 10} \quad r_{i'} &= \sqrt{(x + a_o + a_{i'})^2 + (h_{i'} - y)^2} \\
 I_{o'} &= \sqrt{2} * wkc' * I_{wkc'=100\%} \\
 I_{b'} = I_{m'} &= -\frac{I_{o'}}{2} \\
 \beta_{i'} &= 90^\circ - \text{bgtg} \left(\frac{x + a_o + a_{i'}}{h_{i'} - y} \right)
 \end{aligned}$$

met:

$r_{i'}$: afstand tussen de onderste, middelste of bovenste fase van de lijn en p

wkc' : werkingscapaciteit van de lijn

$I_{o'}$: amplitude van de stroom door de onderste fase van de lijn

$I_{m'}$ en $I_{b'}$: waarde van de lijnstroom door de middelste en bovenste fase van de lijn op het moment dat de stroom door de onderste fase zijn maximale waarde (amplitude) bereikt

$I_{wkc'=100\%}$: de effectieve lijnstroom bij een maximale belasting van deze lijn. Deze waarde wordt berekend uit de niet-gepubliceerde gegevens over de lijnbelastingen voor de periode van 1 jaar (2000-2001) van Elia (Elia (2003b))

Volgens deze formules wordt in principe de grootste waarde van het magnetisch veld berekend die in punt p kan voorkomen bij een bepaalde werkingscapaciteit van de betreffende lijnen. B wordt namelijk berekend op het ogenblik dat de stroom in de onderste fase maximaal is (zijn amplitude bereikt) en dus het B-veld onder de lijn eveneens maximaal is.

1.3.4 Samenvatting

Er werd een analytisch model afgeleid voor de berekening van de elektrische en magnetische veldsterkte van een hoogspanningslijn. Beide modellen zijn niet eenvoudig in één formule weer te geven, maar zijn vrij uitgebreid. Vooral de berekening van de ladingen van de verschillende fasen uitgaande van de lijnspanningen is een complexe berekening die ervoor zorgt dat het berekenen van de elektrische veldsterkte ingewikkelder is dan het berekenen van het magnetisch veld.

1.4 Validatie van het analytisch veld

1.4.1 Doel

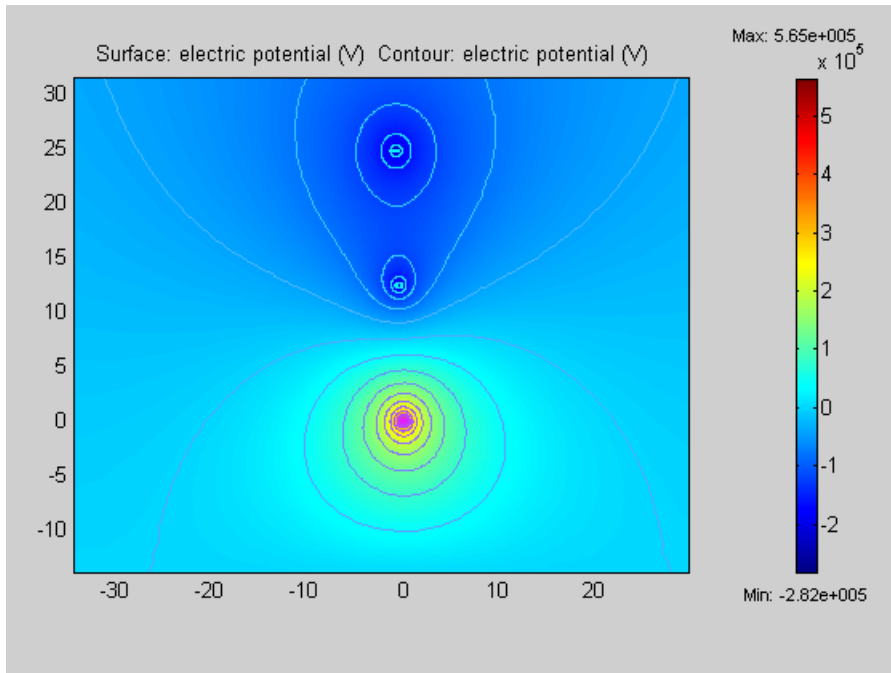
Met de validatie van het model wordt de nauwkeurigheid en aldus de ‘al of niet bruikbaarheid’ van het analytisch model bepaald voor het inschatten van de werkelijke elektrische en magnetische veldsterkten waaraan de algemene bevolking in de nabijheid van luchtlijnen blootgesteld wordt.

In dit opzicht wordt de nauwkeurigheid van het analytisch model enerzijds geverifieerd door middel van het “eindig elementen pakket (Femlab)” en anderzijds aan de hand van “*in situ*” metingen van het elektrisch en magnetisch veld in de nabijheid van luchtlijnen.

1.4.2 Verificatie van het analytisch model door middel van de methode van de eindige elementen

Eindige elementenmethode voor het berekenen van het elektrisch veld

Het elektrisch veld van de luchtlijnen (70, 150 en 380 kV) die in Vlaanderen voorkomen, werd respectievelijk berekend met de “electromagnetics – in plane electrostatics” module van het eindige elementen pakket Femlab. Hiervoor wordt eerst de configuratie ingegeven van de lijn zonder rekening te houden met beeldladingen (zie figuur 6). Hierbij moeten tevens de randvoorwaarden gedefinieerd worden: de grond is een equipotentiaal oppervlak met een potentiaal van 0 V, de waarden van de spanningen worden toegekend aan de verschillende fasen en de ruimtelijke grenzen worden als elektrische isolatie gedefinieerd wat een continuïteit van de veldlijnen garandeert. Vervolgens genereert het programma een “*mesh*”, wat inhoudt dat de volledige gedefinieerde configuratie ruimtelijk wordt opgesplitst in kleine driehoekjes. Uiteindelijk wordt dan voor elk op deze manier geconstrueerd punt van de ruimte de potentiaal en de elektrisch veldsterkte berekend. Figuur 7 toont het resultaat van de berekeningen voor een 380 kV lijn aan één zijde van de mast. Het spanmidden van de onderste geleider of de onderste fase hangt 14,2 m boven het maaiveld.



Figuur 7: Verdeling van de elektrische potentiaal rond een 380 kV lijn (tot op een afstand van ongeveer 30 m links en rechts van de lijn, en van ongeveer 10 m onder de onderste lijn tot 30 m boven de bovenste lijn)

Eindige elementenmethode voor het berekenen van het magnetisch veld

Het magnetisch veld voor de verschillende lijnen, werd berekend met de “electromagnetics – perpendicular currents” module van het eindige elementen pakket. Hiervoor wordt, naar analogie met de berekeningen van het elektrisch veld eerst de configuratie ingegeven van de lijn (zie figuur 5). Hierbij moeten weer de randvoorwaarden gedefinieerd worden: de grond wordt hierbij niet expliciet gedefinieerd, maar wordt gezien als een uitbreiding van de lucht, de waarden van de stromen worden toegekend aan de verschillende fasen en de ruimtelijke grenzen worden gedefinieerd als magnetisch isolatie wat een continuïteit van de B-veldlijnen garandeert. Vervolgens genereert het programma een “mesh”, wat inhoudt dat de volledige gedefinieerde configuratie ruimtelijk wordt opgesplitst in kleine driehoekjes. Voor elk op deze manier geconstrueerd punt van de ruimte wordt dan de magnetische veldsterkte berekend.

Vergelijking van analytisch model met eindige elementenmethode

Tabel 6 toont elektrische en magnetische velden die respectievelijk gemeten (GEM) en berekend werden met het analytisch model (AM) en het eindige elementen pakket (EEP). De berekeningen gebeurden op basis van reële lijnconfiguraties, spanning, geleidersectie, stroombelasting en hoogten van geleiders ten opzichte van elkaar en van het maaiveld. De respectievelijke transversale afstanden (kolom 2 van tabel 6) per lijntype komen overeen met deze van de “in situ” metingen (zie rubriek 1.4.2.). De voor de berekening gebruikte

spanning en stroombelasting komt eveneens overeen met deze die respectievelijk genoteerd werden tijdens het uitvoeren van de “in situ” metingen.

Tabel 6: Berekend en gemeten elektrisch en magnetisch veld

Lijn (kV)	Afstand (m)	E-veld (V/m)			B-veld (μ T)		
		AM	EEP	GEM.	AM	EEP	GEM
70	0	296,9	1306	530	1,64	1,6	1,54
	10	124,85	238,9	115,5	0,85	0,8	0,75
	15	67,26	38	24,6	0,54	0,545	0,48
	20	38,19	69,2	14,9	0,36	0,35	0,33
	30	14,9	73,9	15	0,18	0,17	0,20
	40	7,13	56,4	10,4	0,11	0,1	0,15
	50	3,94	42	7,5	0,07	0,06	0,12
	60	2,42	32,2	5,6	0,05	0,04	0,09
150	0	160	1372	1594	2,32	2,4	3,20
	10	120,8	880,4	690	1,9	1,97	2,25
	20	67,2	282,1	161	1,25	1,28	1,45
	25	49,1	116,5	39	1	1,03	1,17
	30	36,2	23,1	30	0,81	0,79	0,82
	40	20,5	65,4	58	0,55	0,498	0,63
	50	12,4	80,1	21	0,39	0,337	0,57
380	0	2113,9	9710	6400	1,85	1,92	1,95
	10	1374,9	5032	3200	1,37	1,39	1,05
	20	649,6	1120	770	0,82	0,83	0,65
	40	179,5	524	180	0,34	0,31	0,24
	60	69,2	485,5	170	0,18	0,14	0,13
	80	33,2	365	122	0,11	0,07	0,11
	100	18,4	276	85	0,07	0,04	0,09

- *Elektrisch veld*

Uit tabel 6 blijkt dat de elektrische velden respectievelijk berekend met het EEP en het AM voor alle lijntypes sterk van elkaar afwijken. Dit is niet verwonderlijk want uit het verloop van de equipotentiaalijnen in figuur 7 kan reeds afgeleid worden dat een eenvoudige analytische formule ontoereikend is om het werkelijk elektrisch veld met hoge graad van nauwkeurigheid te bepalen. Bovendien is de afwijking tussen de resultaten van beide rekenmethoden sterk verschillend van deze die in situ gemeten (GEM) werden.

- *Magnetisch veld*

Voor het magnetisch veld sluiten de resultaten van het AM en het EEP enerzijds onderling goed bij elkaar aan en anderzijds komen de berekeningen goed overeen met de gemeten magnetische veldsterkte.

- *Besluit*

Het analytisch model voor het berekenen van de magnetische veldsterkte geeft zeer goede resultaten t.o.v. zowel de eindige elementen berekeningen als van *in situ* metingen. Het model voor de berekening van de elektrische veldsterkte daarentegen wijkt ver af van de eindige elementen berekeningen en bovendien wijken beide berekeningsmethoden sterk af van de resultaten van de “in situ” metingen. Uitgaande van deze resultaten werd het analytisch model voor de magnetische veldsterkte in GIS geïmplementeerd, maar werd het model voor de elektrische veldsterkte niet in GIS opgenomen. Bovendien wordt het model voor het berekenen van het elektrisch veld niet verder behandeld.

In-situ metingen van het elektrisch en magnetisch veld

- *Doel*

De “*in situ*” metingen werden speciaal uitgevoerd om het analytisch model en respectievelijk het eindige elementen pakket aan de meetresultaten te toetsen. Daarom werden tijdens de metingen alle mogelijke verklarende variabelen (hoogte geleiders, weersomstandigheden, effectieve spanning, stroombelasting enz.) gemeten en/of achteraf berekend.

- *Meetmethode*

- a. *Meetafstanden tot de lijn*

Om het analytisch model te verifiëren werden een reeks metingen uitgevoerd op verschillende transversale afstanden (tabel 7) van de drie betrokken luchtlijnen. Het betrekkelijk groot aantal meetpunten werd bepaald op basis van het te maken model: om modelmatig een representatieve interpolatie en/of extrapolatie door te voeren heeft men in de praktijk minimum 3 meetpunten nodig. Normaliter wordt uitgegaan van verdubbelde afstanden per opeenvolgende meetpunten; om echter het model te toetsen aan de resultaten van reeds uitgevoerde meetcampagnes in Vlaanderen werden gemeenschappelijke afstanden ingebouwd.

Het elektrisch en magnetisch veld werd steeds in dezelfde meetpunten gemeten en de meethoogte bedroeg telkens 1,5 m boven het maaiveld.

Tabel 7: Meetafstand van de respectievelijke luchtlijn

Lijntype	Transversale afstand tot as van de lijn (m)							
70 kV	0	10	15	20	30	40	50	60
150 kV	0	10	20	25	30	40	50	
380 kV	0	10	20	40	60	80	100	

De as (0 m) van de lijn komt overeen met de projectie van de onderste geleider van de luchtlijn loodrecht op het maaiveld. Vanuit deze as werden telkens alle meetpunten uitgezet. De geselecteerde meetterreinen waren voldoende groot, vlak en zonder hindernissen (struiken of bomen).

b. Hoogtebepaling van de geleiders van de luchtlijnen

De hoogte van de drie verticale geleiders (onderste, middelste en bovenste) werd gemeten door middel van een theodoliet (Topcon TL-1) en een baaklat (Sokkia, Type A, 4 x 1m). De hoogtebepaling wordt gegeven door:

$$\text{Formule 11} \quad HG_{(m)} = a(\text{tg}(100 - \alpha)) + h$$

met:

$HG_{(m)}$ = hoogte van de geleider in meter

a = horizontale afstand tot de lijnas die van de baaklat afgelezen wordt

$\text{tg}(100 - \alpha)$ = tangens van een rechte hoek van 100° die in het zesdelig stelsel overeenkomt met een hoek van 90° in het decimaal stelsel

α = de hoek die met de theodoliet afgelezen wordt

h = de verticale afstand van het maaiveld tot de omwentelingsas van de kijker van de theodoliet

c. Meten van het elektrisch en magnetisch veld

Het elektrisch en magnetisch veld werd gemeten met een veldsterktemeter (PMM 8053, Comtest) die door middel van een optische vezelkabel (10 m) verbonden was met de meetsonde (PMM EHP-50 probe analyzer, Comtest) voor spectrale analyse. De rms-waarde¹ van het E- en B-veld werd respectievelijk gemeten in het frequentiegebied van 5 Hz tot 100 Hz. De x-, y- en z-veldcomponenten, waaruit de resultante (R) berekend wordt (formule 12), werden gelijktijdig gemeten.

$$\text{Formule 12} \quad R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

De globale blootstelling aan het elektrisch of magnetisch veld wordt steeds door de resultante gekarakteriseerd.

¹ Rms: de root mean square of effectieve waarde is de vierkantswortel uit het kwadraat van de gemiddelde fluxdichtheid.

Stroombelasting van de luchtlijnen

De stroom (I in kA) die door de geleiders vloeit wordt berekend uit het actief vermogen (MW), het reactief vermogen ($Mvar$) en de effectieve spanning (U_{eff} in kV) van de lijn. Deze parameters werden ons voor de betrokken meetperiode door de dienst dispatching van Elia Merksem medegedeeld.

Voor een driefasesysteem wordt de stroombelasting van de lijn berekend per fase ($\sqrt{3}$) met:

$$\text{Formule 13} \quad I_{(kA)} = \frac{\sqrt{MW^2 + Mvar^2}}{U_{eff} \cdot \sqrt{3}}$$

Meetresultaten van het elektrisch en magnetisch veld

De luchtlijnen waarvan beide velden respectievelijk gemeten werden, hadden een nominale spanning van 70 kV (lijnummer 70/793), 150 (lijnummer 150/146) en 380 kV (lijnummer 380/23). Voor iedere bemonsterde lijn worden in de tabellen van de volgende paragrafen de volgende variabelen samengevat:

- de transversale afstand tot de lijnas: afstand 0 is het meetpunt loodrecht onder de onderste geleider van de luchtlijn
- het elektrisch veld (E-veld)² per meetpunt uitgedrukt in volt per meter (V/m)
- de effectieve spanning (U_{eff} in kilovolt (kV)) per geleider die vaak verschilt van de nominale spanning
- het magnetisch veld (B-veld)³ per meetpunt uitgedrukt in microtesla (μT)
- de stroom (I in ampere (A)) per fase op het ogenblik dat de meting gebeurde in de respectievelijke meetpunten
- de hoogte van de drie verticale geleiders van de respectievelijke luchtlijnen
- de weersomstandigheden

Daar uit rubriek 1.4.2.3.1 (vergelijking van analytisch model (AM) met eindige elementen pakket (EEP)) blijkt dat het AM niet van toepassing is voor het elektrisch veld zijn de meetgegevens van dit veld louter informatief en zullen aldus niet gebruikt worden om het AM en EEP verder te verifiëren.

a. Gemeten elektrisch en magnetisch veld van 70 kV-lijn

Tabel 8 geeft een overzicht van het E-veld en B-veld respectievelijk gemeten onder/nabij lijn 70/793.

² De sterkte van het elektrisch veld wordt bepaald door de grootte van de spanning van de lijn

³ De sterkte van het magnetisch veld wordt bepaald door de stroombelasting van de lijn. Bij het magnetisch veld wordt een onderscheid gemaakt tussen de magnetische veldsterkte (H in A/m) en de magnetische fluxdichtheid of het magnetische inductieveld B (in tesla (T) of een kleinvoud ervan: $1T = 1,26 \cdot 10^6$ A/m dat afhankelijk is van de magnetische eigenschappen van de middenstof (b.v. lucht, biologisch materiaal) waarin de golf zich voortplant. Het is het B-veld dat gemeten wordt.

Tabel 8: E- en B-veld gemeten bij een 70 kV-lijn

Transversale afstand tot lijn (m)	E-veld (V/m)	U(eff) (kV)	B-veld (μ T)	I(A)
0	530	71,3	1,54	130
10	115,5	71,3	0,75	126
15	24,6	71,2	0,48	126
20	14,9	71,2	0,33	118
30	15	71,3	0,20	130
40	10,4	71,4	0,15	130
50	7,5	71,3	0,12	122
60	5,6	71,4	0,09	118
Hoogte van lijngeleiders: onderste geleider : 9,8 m middelste geleider: 13,5 m bovenste geleider : 16,8 m	Weersomstandigheden: zonnig droog wind: 3 à 4 beaufort temperatuur: 20°C			

b. Gemeten elektrisch en magnetisch veld van 150 kV-lijn

Tabel 9 geeft een overzicht van het E-veld en B-veld respectievelijk gemeten onder/nabij lijn met nummer 150/146.

Tabel 9: E- en B-veld gemeten bij een 150 kV-lijn

Transversale afstand tot lijn (m)	E-veld (V/m)	U(eff) (kV)	B-veld (μ T)	I(A)
0	1594	157,5	3,20	400
10	690	157,5	2,25	397
20	161	157,6	1,45	400
25	39	157,6	1,17	400
30	30	157,6	0,82	375
40	58	157,6	0,63	396
50	21	157,8	0,57	403
55	-	-	0,55	408
Hoogte van lijngeleiders: onderste geleider : 19,5 m middelste geleider: 26,8 m bovenste geleider : 33,1 m	Weersomstandigheden: zonnig droog wind: 1 - 2 beaufort temperatuur: 24°C			

c. Gemeten elektrisch en magnetisch veld van 380 kV-lijn

Tabel 10 geeft een overzicht van het E-veld, elektrisch veld en het magnetisch veld respectievelijk gemeten onder/nabij de lijn met nummer 380/23.

Tabel 10: E- en B-veld gemeten bij een 380 kV-lijn

Transversale afstand tot lijn (m)	E-veld (V/m)	U(eff) (kV)	B-veld (μ T)	I(A)
0	6400	400	1,95	135
10	3200	399,5	1,05	136
20	770	399,5	0,65	136
40	180	399,5	0,24	141
60	170	399,5	0,13	150
80	122	399	0,11	152
100	85	399	0,09	154
Hoogte van lijngeleiders: onderste geleider : 14,2m middelste geleider: 26,5 m bovenste geleider : 39,0 m		Weersomstandigheden: zonnig droog wind: 1 - 2 beaufort temperatuur: 24° C		

Toetsing van het analytisch model en het eindige elementenpakket aan het in-situ gemeten magnetisch veld

Tabel 11 geeft een overzicht van het inductieveld (B-veld) dat op verschillende afstanden van het spanmidden van de betrokken lijnen onder gecontroleerde omstandigheden gemeten en respectievelijk berekend werd door middel van het analytisch model (AM) en het eindige elementen pakket (EEP)

Tabel 11: Gemeten en berekend B-veld

Lijn (kV)	Afstand (m)	B-veld (μ T)		
		Gemeten	AM	EEP
70	0	1,54	1,64	1,6
	10	0,75	0,85	0,8
	15	0,48	0,54	0,55
	20	0,33	0,36	0,35
	30	0,20	0,18	0,17
	40	0,15	0,11	0,1
	50	0,12	0,07	0,06
	60	0,09	0,05	0,04
150	0	2,35	2,32	2,4
	10	2,25	1,9	1,97
	20	1,45	1,25	1,28
	25	1,17	1	1,03
	30	0,82	0,81	0,79
	40	0,63	0,55	0,498

	50	0,57	0,39	0,337
	55	0,55	0,33	0,27
380	0	1,95	1,85	1,92
	10	1,05	1,37	1,39
	20	0,65	0,82	0,83
	40	0,24	0,34	0,31
	60	0,13	0,18	0,14
	80	0,11	0,11	0,07
	100	0,09	0,07	0,04

- AM: analytisch model
- EEP: eindige elementen pakket

Het antwoord op de vraag of de resultaten die op de drie verschillende manieren bekomen werden al dan niet substantieel van elkaar verschillen is gebaseerd op de statistische beslissingstheorie die op haar beurt gestoeld is op het testen van hypothesen en significantie (Vining, 1998). Zo wordt op basis van de steekproefinformatie van tabel 12 een besluit getrokken in verband met het al dan niet verschillend zijn van het populatiegemiddelde van het B-veld dat bekomen werd door meten, bereken met AM en bereken met EEP.

Om hierover een uitspraak te doen werden de drie volgende hypothesen getest:

- is het populatiegemiddelde van het gemeten B-veld (μ_1) significant verschillend van dat berekend met AM (μ_2):

H_0 : $\mu_1 = \mu_2$ en er is geen significant verschil tussen metingen en AM

H_1 : $\mu_1 \neq \mu_2$ en er is wel een significant verschil tussen metingen en AM

- is het populatiegemiddelde van het gemeten B-veld (μ_1) significant verschillend van dat berekend met EEP(μ_2):

H_0 : $\mu_1 = \mu_2$ en er is geen significant verschil tussen metingen en EEP

H_1 : $\mu_1 \neq \mu_2$ en er is wel een significant verschil tussen metingen en EEP

- is het populatiegemiddelde van het B-veld berekend met AM (μ_1) significant verschillend van dat berekend met EEP (μ_2):

H_0 : $\mu_1 = \mu_2$ en er is geen significant verschil tussen AM en EEP

H_1 : $\mu_1 \neq \mu_2$ en er is wel een significant verschil tussen AM en EEP

Daar hier de kleine steekproefstatistiek (small sampling theory) best van toepassing is wordt het toetsen van de hypothesen uitgevoerd door middel van de t-test (Vining, 1998), waarbij het resultaat door middel van de prob-waarde (p-value (Vining, 1998) tweezijdig aan een significantieniveau (α) van 0,05 (5%) aan de 'Student's distribution' getoetst wordt. Door gebruik te maken van $\alpha = 0,05$ kan met een betrouwbaarheid of zekerheid van $(1 - 0,05) = 0,95$ of 95% gesteld worden dat hetzij H_0 aanvaard en H_1 verworpen wordt hetzij dat H_0

verworpen en H_1 aanvaard wordt. De analyses worden uitgevoerd met het softwarepakket “Statistica”

Tabel 12 geeft een overzicht van de resultaten van de geteste hypothesen die bekomen werden door de t-test

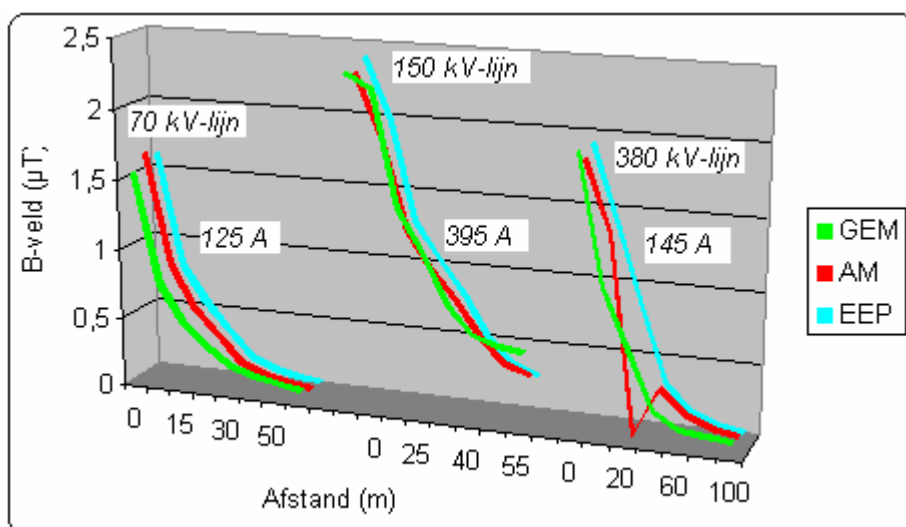
Tabel 12: Resultaten van de geteste hypothesen per lijntype

Lijntype	Vergelijking	p-waarde t.o.v. sn*	Significant verschil
70 kV	- Gemeten met AM - Gemeten met EEP - AM met EEP	p = 0,95 p = 0,99 p = 0,95	neen neen neen
150 kV	- Gemeten met AM - Gemeten met EEP - AM met EEP	p = 0,67 p = 0,70 p = 0,98	neen neen neen
380 kV	- Gemeten met AM - Gemeten met EEP - AM met EEP	p = 0,84 p = 0,86 p = 0,98	neen neen neen

Sn*: significantieniveau $\alpha = 0,05$

Daar p steeds groter is dan 0,05 ($p > \alpha$) kan met een zekerheid van 95% besloten worden dat er voor geen enkel lijntype een significant verschil is tussen het gemeten B-veld en dat berekend werd met AM en respectievelijk EEP. Bovendien is er een hoge graad van overeenkomst tussen AM en EEP.

De resultaten van de drie methoden worden in figuur 8 gevisualiseerd.



Figuur 8: Illustratie van het B-veld bekomen met de drie methoden (GEM: gemeten, AM: analytisch model en EEP: eindige elementen pakket)

Ofschoon tegenstrijdig met het vermogen van de lijnen noteert men een globaal sterker B-veld bij de 150 kV-lijn dan bij de 380 kV-lijn. Dit komt omdat de gemiddelde stroombelasting per fase tijdens het “in situ” meten hoger lag bij de 150 kV-lijn (395 A) dan bij de 380 kV-lijn (145 A).

Op grond van bovenstaande analyses kan als besluit van deze paragraaf gesteld worden dat het ontwikkeld analytisch model een geschikte methode is voor het berekenen van het 50 Hz magnetisch veld op willekeurige afstand van luchtlijnen. Het model is aldus bruikbaar voor het uiteindelijke doel n.l. het ontwikkelen van een GIS-toepassing waarbij de blootstelling van de bevolking aan het magnetisch veld van luchtlijnen kan in kaart gebracht en gevisualiseerd worden.

Toetsing van het analytisch model aan de meetgegevens van een meetcampagne in Vlaanderen

Een bijkomende methode om de geschiktheid van het AM te verifiëren is het vergelijken van het berekend B-veld met de waarnemingen van een meetcampagne in Vlaanderen waarbij het B-veld van 70, 150 en 380 kV-luchtlijnen in 2002 in opdracht van Elia gemeten werd (Decat, 2002).

Voor deze meetcampagne werd het B-veld van 15 spannen van een 70 kV, 30 van een 150 en 24 van een 380 kV luchtlijn gemeten op minimum 3 verschillende transversale afstand van de onderste geleider van de lijn. Tijdens het meten werden steeds de parameters (effectieve spanning, actief- en reactief vermogen) geregistreerd. Daar er geen hoogtemetingen van de geleiders uitgevoerd werden werden de te bemonsteren spannen zodanig geselecteerd dat het reliëf van het meetterrein eveneens de grootte van het gemeten B-veld kon beïnvloeden.

Voor het toetsen van het AM aan deze meetgegevens werden de volgende parameters uit deze meetcampagne geëxtraheerd:

- stroombelasting per fase waarop de berekeningen van het B-veld met het AM gebaseerd zijn
- de sterkte van het B-veld gemeten onder de verschillende spannen van de respectievelijk bemonsterde luchtlijnen.

De AM berekeningen zijn gebaseerd op de drie volgende variabelen:

- de hoogte van de onderste geleider en bijgevolg de hoogte van de twee andere geleiders
- de transversale afstand tot het spanmidden van de lijn
- en de stroombelasting van de respectievelijke lijnen die tijdens de meetcampagne geregistreerd werd.

Tabel 13 geeft een overzicht van de grootten van deze variabelen.

Tabel 13: Variabelen voor het berekenen van het B-veld met het AM

Lijntype (kV)	N					Stroom (A)	
70	B72 G45	Hoogte onderste geleider (m)	7	12	17	22	154 - 208
		Transversale afstand tot spanmidden (m)	0	0	0	0	
			15	15	15	15	
			30	30	30	30	
150	B180 G60	Hoogte onderste geleider (m)	7	12	17	22	28 - 278
		Transversale afstand tot spanmidden (m)	0	0	0	0	
			25	25	25	25	
			50	50	50	50	
380	B240 G58	Hoogte onderste geleider (m)	10	15	20	25	239 - 1091
		Transversale afstand tot spanmidden (m)	0	0	0	0	
			40	40	40	40	
			80	80	80	80	

De interpretatie van tabel 13 gebeurt als volgt:

- N: steekproefgrootte voor het berekende (prefix B) en respectievelijk gemeten (prefix G..) B-veld.
- Voor het bepalen van de vier hoogtes waarop het B-veld respectievelijk berekend werd werd uitgegaan van de minimum verplichte afstand (of iets hoger) van het maaiveld en de onderste geleider van de betrokken luchtlijn. Daar de afstand tussen de opeenvolgende geleiders constant is, verhoogt de afstand van twee bovenhangende geleiders van het driefasesysteem eveneens automatisch met hetzelfde hoogte-interval.
- De transversale afstand tot het spanmidden van de lijn was afhankelijk van het lijntype en was eveneens gebaseerd op de meetcampagne van het B-veld in Vlaanderen (Decat, 2002): voor de 70 kV-lijn was dit voor de vier hoogtes 0 (onder de geleider), 15 en 30 m van de onderste geleider.
- De stroombelasting waarop de berekeningen gebaseerd waren zijn eveneens gebaseerd op de meetcampagne van het B-veld in Vlaanderen (Decat, 2002): bijvoorbeeld, bij de 70 kV-lijn werd het B-veld berekend uit 6 verschillende stroombelastingen (gelegen tussen 154 en 208 A) van verscheidene 70 kV luchtlijnen die tijdens de meetcampagne onderzocht werden. Aldus werden voor de 70 kV-lijn 108 (6 stromen x 4 hoogtes x 3 transversale afstanden = B72) B-velden met het AM gesimuleerd

De gegevens van tabel 13 voor de 150 en 380 kV-lijnen kunnen op dezelfde manier geïnterpreteerd worden.

Tabel 14 geeft een overzicht van de gemiddelde en de 95% betrouwbaarheidsintervallen respectievelijk van de gemeten en met het AM berekende B-velden van de betrokken luchtlijnen.

Tabel 14: Toetsing van het AM model aan de meetgegevens

Lijn (kV)	Methode	N	B-veld (μT)			p-waarde t.o.v. sn^*	Significant Verschil
			Gemiddeld	BI -95%	BI +95%		
70	AM	72	0,67	0,55	0,78	0,082	neen
	GEM	45	0,50	0,33	0,66		
150	AM	180	0,54	0,45	0,63	0,055	neen
	GEM	60	0,38	0,30	0,45		
380	AM	240	1,25	1,06	1,43	0,280	neen
	GEM	58	1,03	0,70	1,36		

BI-95%: ondergrens van het 95% betrouwbaarheidsinterval

BI+95% bovengrens van het 95% betrouwbaarheidsinterval

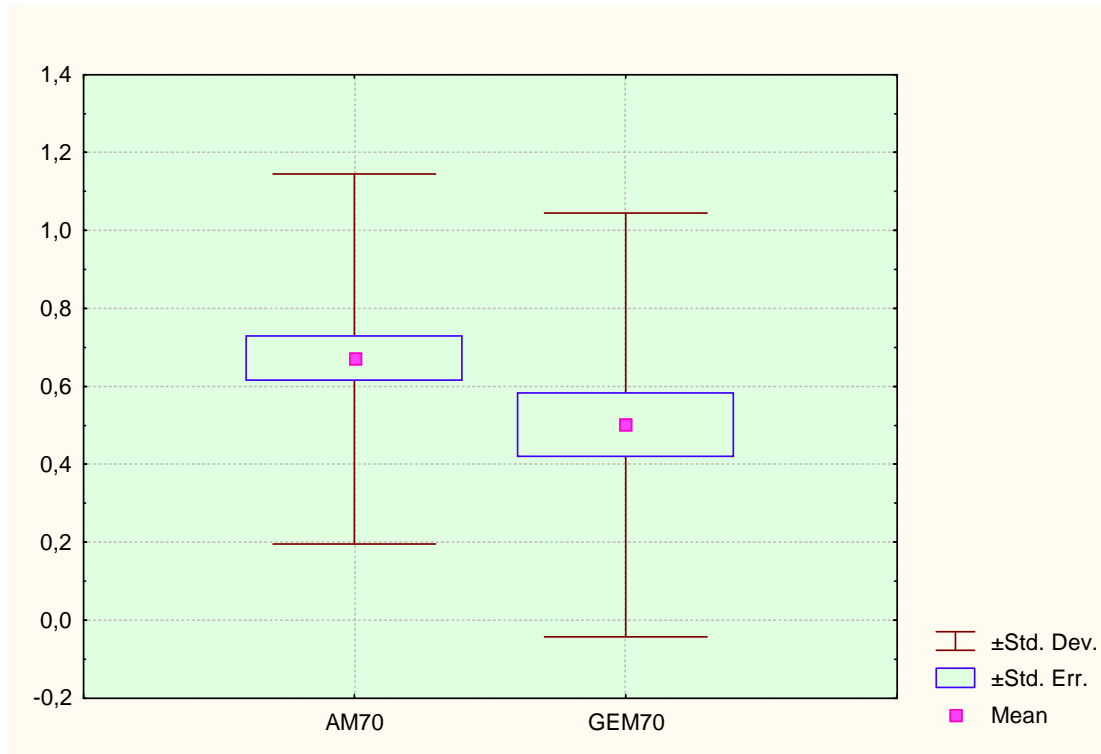
sn^* : significantieniveau van 0,05

AM: B-veld van analytisch model

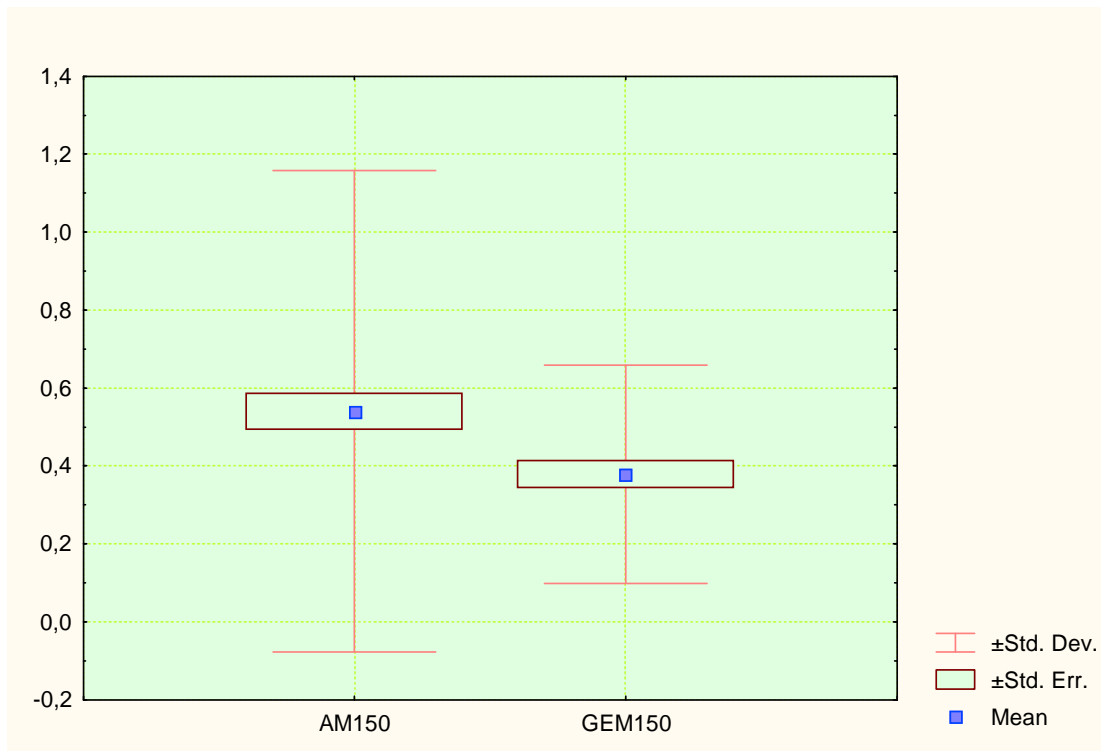
Ofschoon minder uitgesproken dan in de eerste verificatiemethode (zie rubriek 4.2.4) waarbij alle parameters naast de stroom ook de hoogte geregistreerd werd, tonen de respectievelijke p-waarden van tabel 14 aan dat er ook in geen enkel geval een significant verschil is tussen het gemeten en het AM-berekende B-veld.

De overeenkomst tussen beide methoden wordt in de drie volgende figuren gevisualiseerd aan de hand van:

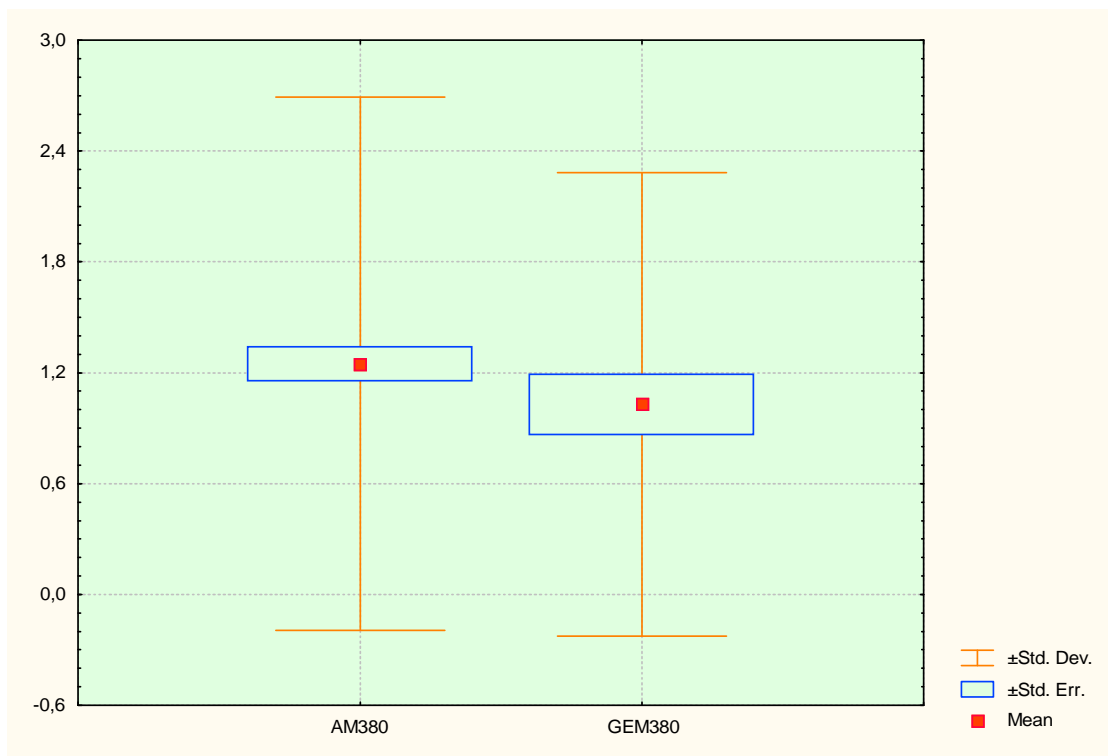
- de gemiddelde [(Mean) \pm de standaarddeviatie (\pm Std. Dev.) en \pm de standaardfout (\pm Std. Err.)] sterkte van het B-veld van de gegevens gegenereerd met het AM per lijntype (b.v.: AM70 zijn de statistieken voor de 70 kV-lijn)
- de gemiddelde sterkte van het B-veld berekend uit de gegevens van de meetcampagne Vlaanderen (b.v.: GEM70 zijn de statistieken voor de 70 kV-lijn).



Figuur 9: Vergelijking tussen AM en gemeten B-veld van de 70 kV-lijnen



Figuur 10: Vergelijking tussen AM en gemeten B-veld van de 150 kV-lijnen



Figuur 11: Vergelijking tussen AM en gemeten B-veld van de 380 kV-lijnen

1.5 Besluit Deel 1

1.5.1 Magnetisch veld

Voor wat de validatie van het analytisch model (AM) betreft kan aan de hand van de verificatie van het AM t.o.v. het eindige elementen pakket enerzijds en t.o.v. de gecontroleerde en respectievelijk het “at random” gemeten magnetisch veld tijdens een meetcampagne in Vlaanderen anderzijds met een zekerheid van 95% besloten worden dat het ontwikkelde AM een volwaardige, betrouwbare en nauwkeurige model is om het magnetisch veld op willekeurige afstanden en hoogtes te berekenen. Daarom is dit model een aangewezen instrument om in het beoogde GIS-model ingebouwd te worden teneinde de blootstelling van de bevolking aan het magnetisch veld van luchtlijnen in kaart te brengen en te visualiseren.

1.5.2 Elektrisch veld

Omwille van de in de inleiding aangehaalde epidemiologische problemen die zich enkel bij het magnetisch en niet bij het elektrisch veld voordoen en daar bovendien uit het volgende bleek dat:

- het verloop van de equipotentiaalijnen (figuur 7)

- het gebrek in overeenkomst tussen de met het AM berekende elektrische veldsterkte en die gemeten werden
- de afwijking tussen het AM en de eindige elementen methode kon al snel afgeleid worden dat het ontwikkelen van een eenvoudige analytische formule, binnen de toegekende middelen van deze opdracht, ontoereikend was. Ofschoon de ontwikkeling van de formule gestopt werd vormen de reeds geleverde inspanningen echter de sleutel van de oplossing van de ontwikkelen van een nauwkeurig analytisch model om het elektrisch veld via GIS in kaart te brengen. Daar het elektrisch veld sterkt afgeschermd wordt door allerlei hindernissen zoals struiken, bomen, muren enz., waardoor de veldsterkte snel naar het backgroundniveau daalt is de vraag of zulk model naast het informatieve nog een ander nut heeft. Het epidemiologisch gezondheidsprobleem dat zich bij blootstellingen aan het magnetisch veld voordoet gebeurt bijna uitsluitend door een continu blootstelling van kinderen tussen 0 en 14 jaar in hun woning nabij hoogspanningslijnen. In deze woningen wordt het elektrisch veld immers bijna volledig geblokkeerd door de muren.

2 DEEL 2: GIS-TOEPASSING OM DE BLOOTSTELLING AAN HET MAGNETISCH VELD VAN LUCHTLIJNEN IN VLAANDEREN IN KAART TE BRENGEN

2.1 Doel

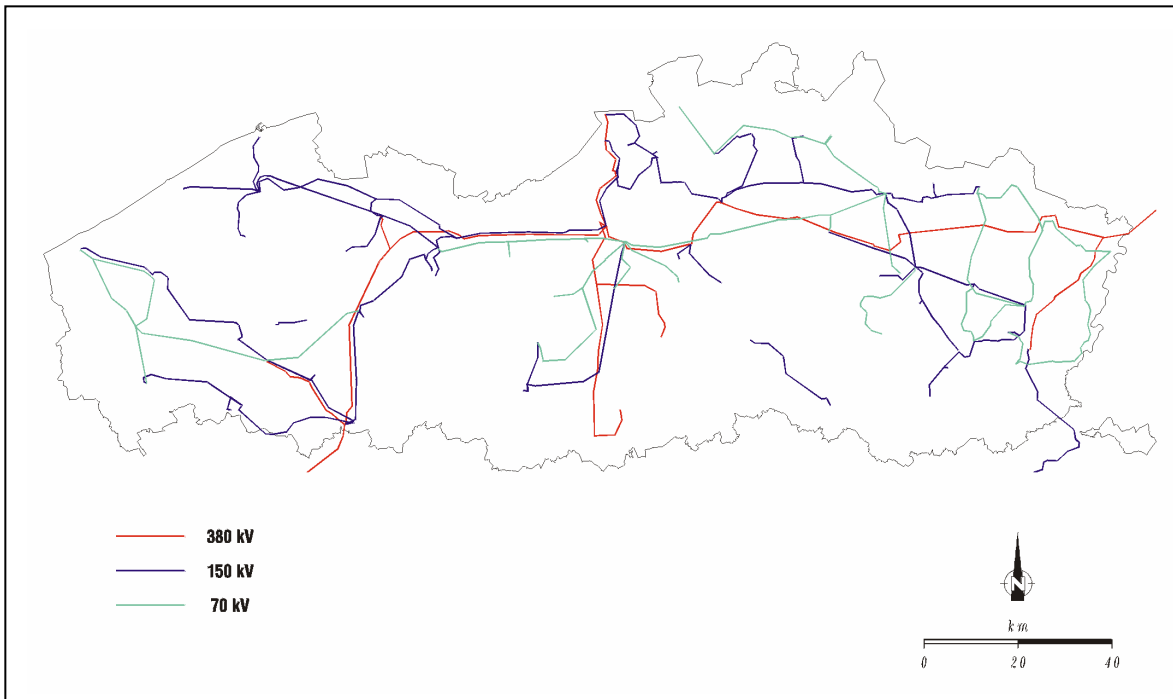
Het doel van dit deel is, met behulp van GIS, de sterkte van het magnetisch inductieveld (B-veld) van bovengrondse hoogspanningslijnen (luchtlijnen) in kaart te brengen en op die manier de volgende vragen te beantwoorden:

- welk is de sterkte van het B-veld in functie van de afstand tot de onderste geleider van respectievelijk de 70, 150 en 380 kV luchtlijnen in Vlaanderen?
- op welke afstand van de onderste geleider van de respectievelijke lijnen is het B-veld zwakker dan de epidemiologische drempelwaarde van 0,4 μT ?
- hoe groot is de proportie van de bevolking in Vlaanderen die aan een B-veld van tenminste 0,4 μT blootgesteld wordt?

2.2 Digitaliseren van de GIS-kaarten

De GIS-kaarten van dit rapport werden door middel van de geografische kaart van het hoogspanningsnet van België (Elia, jaarverslag 2002) uitsluitend voor de 70, 150 en 380 kV luchtlijnen in Vlaanderen door Vito (2003) gedigitaliseerd. Voor gekende lijnummers werden de lijnen geïdentificeerd door middel van de lijnummers die door Elia gebruikt worden. Indien de lijnummers echter niet gekend waren werd de lijnverbinding afgekort met de drie eerste letters (in sommige gevallen de vier eerste letters) van de vertrek- en respectievelijk de eindpost van de lijnverbinding. Indien bijvoorbeeld het lijnummer van de 380 kV verbinding tussen Massenhoven en Maasbracht niet gekend was werd dit in het GIS-bestand geschreven onder de naam van “380/MAS-MAA”. De elektronische versie van de GIS-bestanden (HSL70_50 – HSL380_100) werden op 24 juli 2003 los van dit rapport aan VMM toegestuurd. In deze bestanden zijn alle gegevens voor het digitaliseren en het identificeren van de kaarten enerzijds en het berekenen van het B-veld van de luchtlijnen anderzijds opgenomen.

Figuur 12 geeft een algemeen beeld van de GIS-kaart die gedigitaliseerd werd voor de drie bovengrondse hoogspanningslijnen (70, 150 en 380 kV) in Vlaanderen.



Figuur 12: GIS-kaart van Vlaanderen met de bovengrondse hoogspanningslijnen van 70, 150 en 380 kV

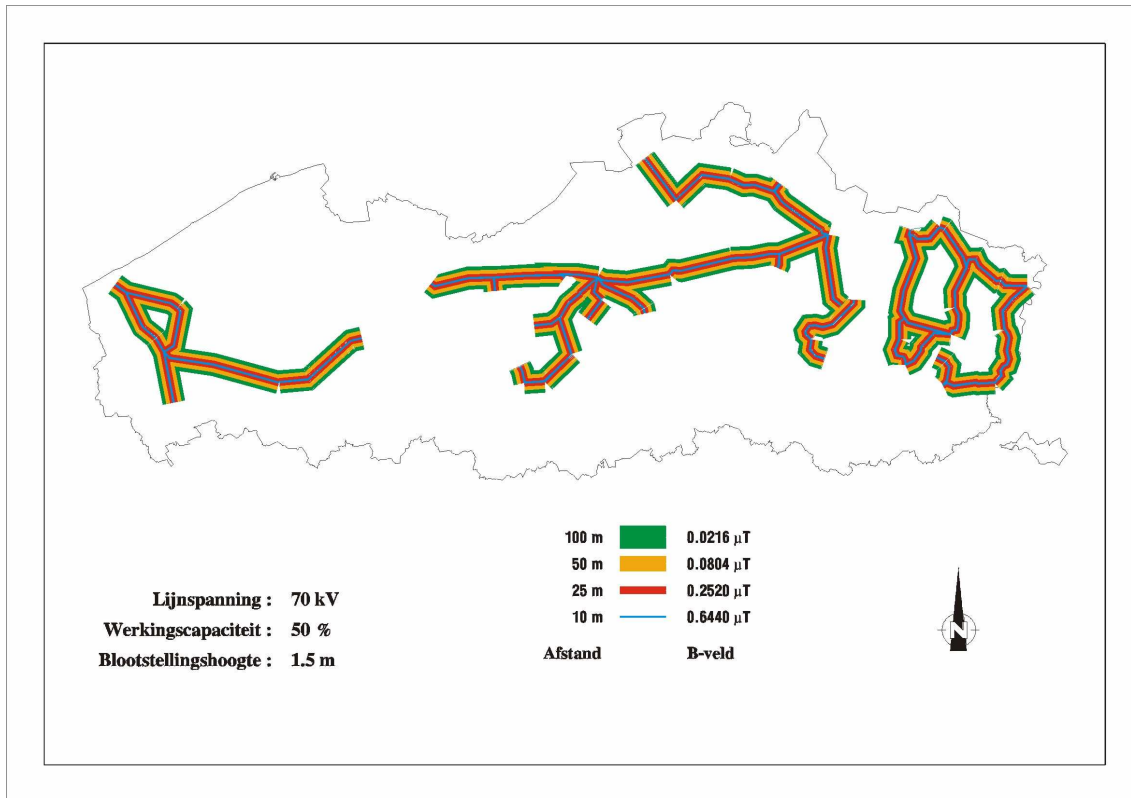
2.3 Emissiekaarten van het B-veld per lijntype

Om deze GIS-kaarten te ontwikkelen werd het B-veld berekend door middel van het in deel I ontwikkelde analytisch model. Er werd uitgegaan van:

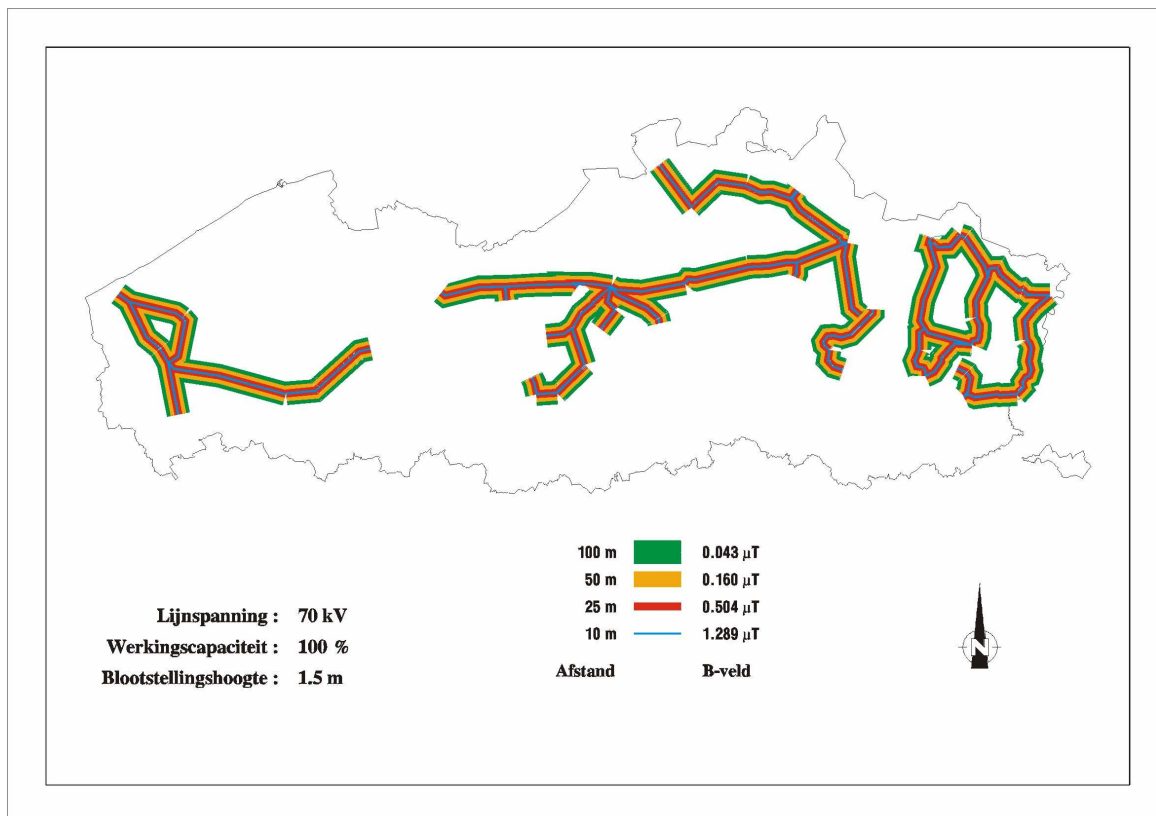
- het gemiddelde van de maximale stromen ($I(\max)$) die door Elia per lijntype gedurende de periode 2000 – 2001 geregistreerd werden. Voor de lijnen waarvan de $I(\max)$ niet gekend was (missing data) werd het gemiddelde genomen van de lijnen waarvan $I(\max)$ wel gekend was. De gemiddelde $I(\max)$ -waarden waarop de berekeningen gebaseerd zijn waren 265, 300 en 850 A voor respectievelijk de 70, 150 en de 380 kV-lijnen
- de gemiddelde hoogte van de onderste geleider op 14, 15 en 18 m voor respectievelijk de 70, 150 en 380 kV-lijnen
- een werkingscapaciteit van respectievelijk 50% en 100% van de gemiddelde $I(\max)$
- een constante blootstellingshoogte (Y) van 1,5 m
- vaste transversale afstanden op 10, 25, 50 en 100 m van de onderste geleider van de respectievelijke lijnen

2.3.1 Emissiekaarten voor het B-veld van 70 kV-lijnen

Figuren 13 en 14 geven het bovenaanzicht van de B-veldemissie van de 70 kV-lijnen in Vlaanderen bij een werkingscapaciteit van respectievelijk 50% en 100%.



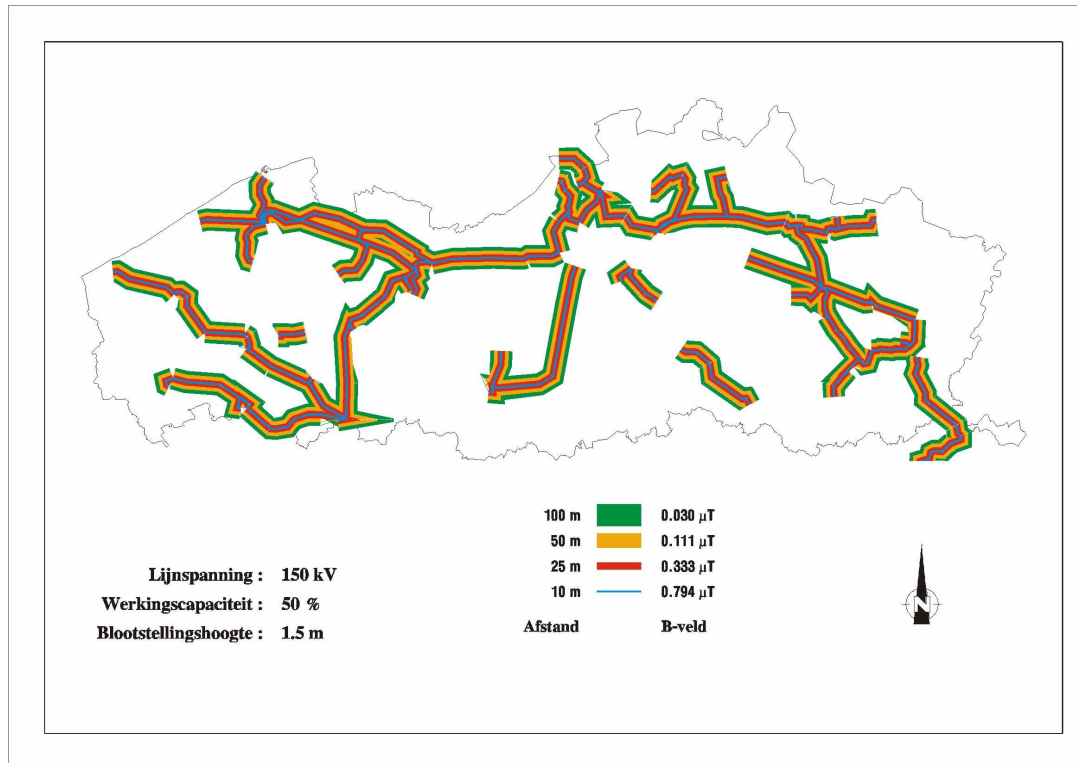
Figuur 13: Gemiddelde B-veldemissie van 70 kV-lijnen bij een werkingscapaciteit van 50%



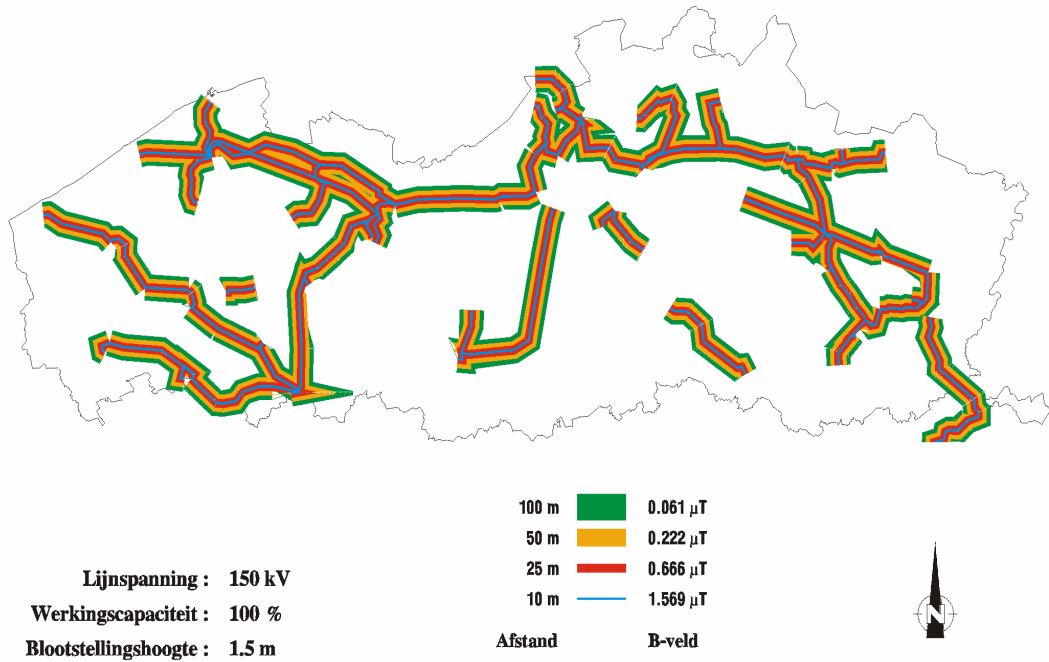
Figuur 14: Gemiddelde B-veldemissie van 70 kV-lijnen bij een werkingscapaciteit van 100%

2.3.2 Emissiekaarten voor het B-veld van 150 kV-lijnen

Figuren 15 en 16 geven het bovenaanzicht van de B-veldemissie van de 150 kV-lijnen in Vlaanderen bij een werkingscapaciteit van respectievelijk 50% en 100%.



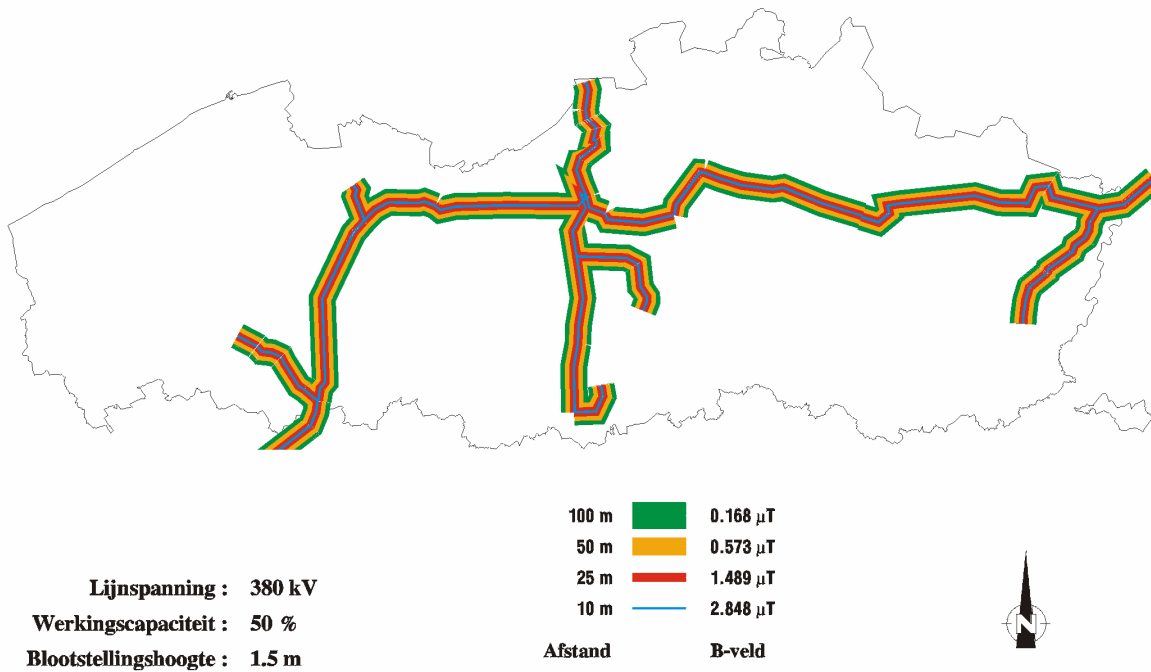
Figuur 15: Gemiddelde B-veldemissie van 150 kV-lijnen bij een werkingscapaciteit van 50%



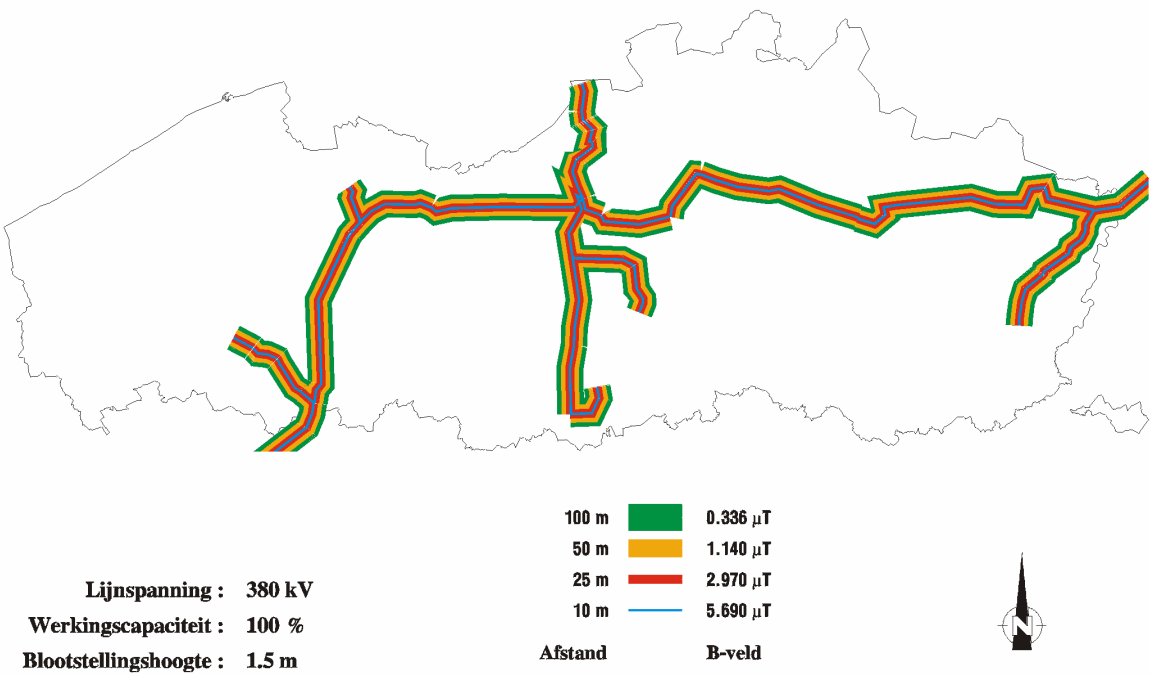
Figuur 16: Gemiddelde B-veldemissie van 150 kV-lijnen bij een werkingscapaciteit van 100%

2.3.3 Emissiekaarten voor het B-veld van 380 kV-lijnen

Figuren 17 en 18 geven het bovenaanzicht van de B-veldemissie van de 380 kV-lijnen in Vlaanderen bij een werkingscapaciteit van respectievelijk 50% en 100%.



Figuur 17: Gemiddelde B-veldemissie van 380 kV-lijnen bij een werkingscapaciteit van 50%



Figuur 18: Gemiddelde B-veldemissie van 380 kV-lijnen bij een werkingscapaciteit van 100%

Terwijl de kaarten van dit deelrapport slechts de emissie van het B-veld op vaste afstanden (10 – 100 m), een constante blootstellingshoogte (1,5 m) en vaste werkingscapaciteiten (50 & 100%) kunnen illustreren zal de digitale versie ervan de gebruiker in staat stellen om de blootstelling te bepalen in functie van :

- het lijntype en de verbinding van de luchtlijn
- een willekeurig te kiezen transversale afstand (X) tot de lijn
- een willekeurig te kiezen blootstellingshoogte (Y) t.o.v. het maaiveld
- een willekeurig te kiezen hoogte van de onderste geleider (en bijgevolg de middelste en bovenste geleider van de lijn t.o.v. het maaiveld
- een willekeurig te kiezen werkingscapaciteit van de lijn

Hoe meer het GIS-bestand kan aangevuld worden met specifieke lijnparameters zoals de maximale stroombelasting en de overeenkomstige tijdspercentielen enerzijds en andere factoren zoals o.a. de lijnhoogte anderzijds zal de inschatting van de emissie of de blootstelling steeds nauwkeuriger worden.

2.4 Bepaling van de 0,4 μ T drempelafstand

De tweede doelstelling van deel 2 is het inschatten van de grensafstand waarin de sterkte van het B-veld tenminste gelijk is aan 0,4 μ T. Om deze afstanden te bepalen en tevens de GIS-kaarten op te stellen werden een aantal representatieve B-velden gegenereerd in functie van de verschillende afstanden. De berekening van het B-veld gebeurde met het analytisch model van deel 1 en is gebaseerd op de stroombelasting bij een gemiddelde werkingscapaciteit van de respectievelijke lijnen. Nadat een reeks representatieve B-velden gegenereerd waren in functie van de afstand, werd, in tegenstelling tot de meest gangbare procedure, de afstand (x) op de B-veldsterkte (y) gemodelleerd. De bestpassende functie van dit model was een machtsfunctie ($r = 0,995$) die gegeven wordt in formule 14.

$$\text{Formule 14: } x_{(m)} = \alpha + \beta y^c$$

met:

- $x_{(m)}$ = aan de transversale afstand tot de onderste geleider van de luchtlijn
- α = aan de intercept
- β = aan de hellingscoëfficiënt
- y^c = drempelwaarde van het B-veld (gelijk aan 0,4 μ T) tot de macht c

Tabel 15 geeft de waarden van formule 14 per lijntype.

Tabel 15: Waarden van de machtsfunctie (formule 14) per lijntype

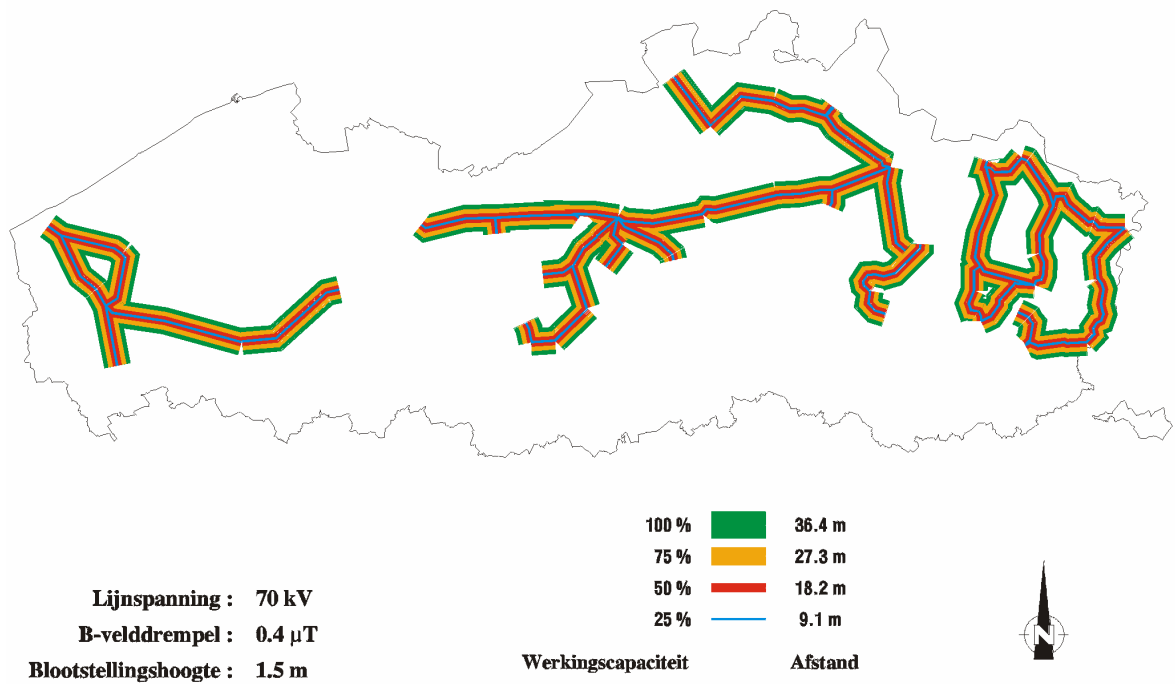
Modelparameters	Lijntype		
	70 kV	150 kV	380 kV
α	-28,1	-24,8	-7,1
β	33	37,6	46
c	-0,37	-0,39	-0,49

De grensafstand tot de onderste geleider van de lijn en waarbinnen de veldsterkte tenminste 0,4 μ T bedraagt wordt voor de verschillende lijntypes en vier werkingscapaciteiten van de lijn in tabel 16 samengevat.

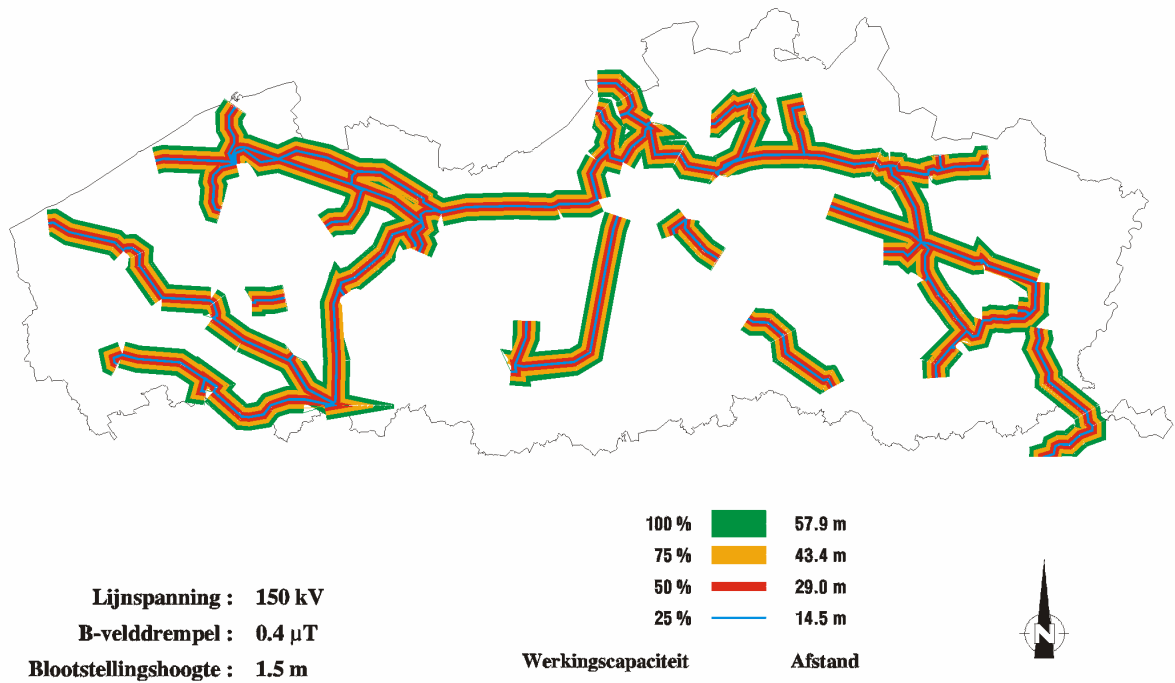
Tabel 16: 0,4 μ T grensafstand voor verschillende werkingscapaciteiten van de verschillende lijntypes

Werkingscapaciteit van de lijn	Lijntype		
	70 kV	150 kV	380 kV
25%	9 m	15 m	33 m
50%	18 m	30 m	66 m
75%	27 m	43 m	98 m
100%	36 m	58 m	130 m

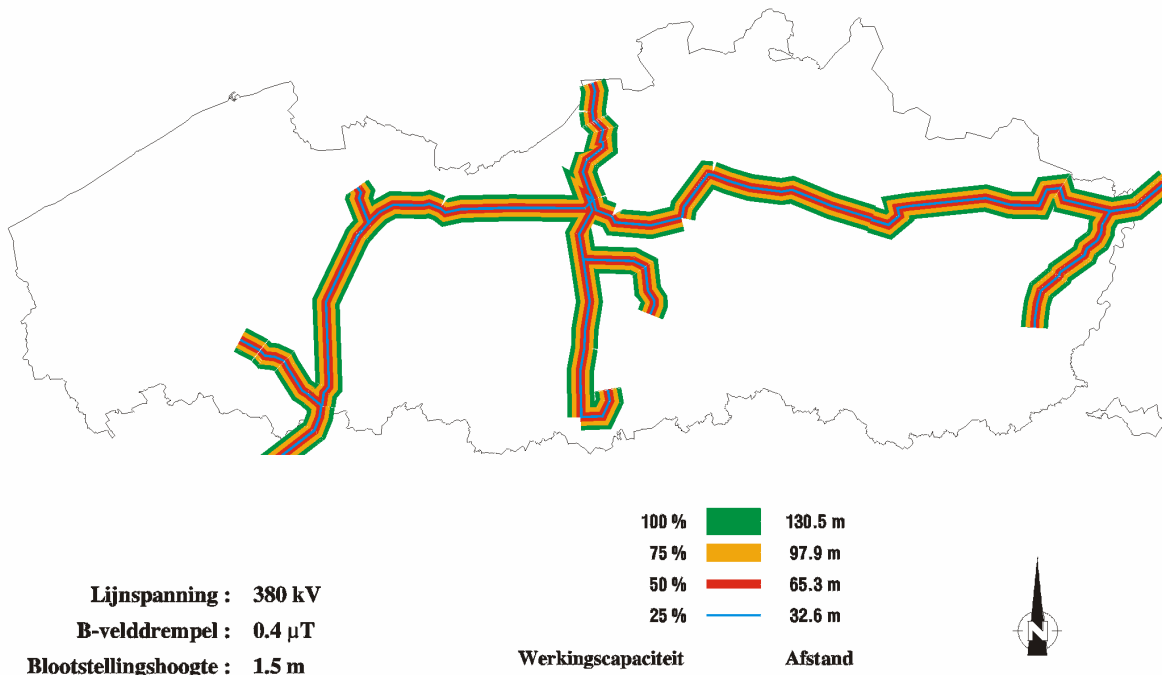
In de volgende drie GIS-kaarten (figuren 19, 20 en 21) worden de gegevens van tabel 16 geïllustreerd.



Figuur 19: Giskaart voor 0,4 μ T afstand voor de 70 kV-lijnen



Figuur 20: Giskaart voor 0,4 μ T afstand voor de 150 kV-lijnen



Figuur 21: Giskaart voor 0,4 μ T afstand voor de 380 kV-lijnen

De elektronische versie van deze GIS-kaarten zal de mogelijkheid bieden om ook de grensafstanden van andere drempelwaarden dan 0,4 μ T te bepalen.

2.5 Blootstelling aan magnetisch veld van gemiddeld 0,4 μ T

2.5.1 Schatting van de blootstelling

Op basis:

- o van het gegeven dat in Vlaanderen 5.972.781 personen wonen op een oppervlakte van 13.522 km² (NIS-INS, 2002) en dit overeenkomt met een bevolkingsdichtheid van 442/km².
- o van 1.345.685 kinderen van de leeftijdsgroep tussen 0 en 19 jaar die in Vlaanderen wonen en dit overeenkomt met een dichtheid van 99,5/km² ((NIS-INS, 2002)
- o van het gegeven dat een doorsnee Vlaams huisgezin gemiddeld 2,46 personen telt (NIS-enquête, 2001)
- o van de totale geografische lengte van de hoogspanningslijnen per lijntype in 2002 (Elia, jaarverslag 2002)
- o van de diameter van de 0,4 μ T contour van het B-veld per lijntype en per werkingscapaciteit (tabel 16 en figuren 19, 20 en 21)
- o van de 0,4 μ T contour bij 50 % en 100 % (worst case) werkingscapaciteit (wkc) (tabel 16)
- o dat 5 %, 4,6 % en 2 % van het respectievelijk aantal km 70, 150 en 380 kV-luchtlijn de bebouwde kom doorkruist (Elia, ongepubliceerde gegevens)
- o van de bevolkingsstatistieken van NIS-INS (2002) getransformeerd naar de bevolkingsdichtheid in de bebouwde kom

wordt geschat dat ongeveer 0,7 % (bij wkc = 50%) en respectievelijk 1,4% (bij wkc = 100 %) van de Vlaamse bevolking blootgesteld wordt aan een gemiddeld B-veld van 0,4 μ T. Tabel 17 geeft een samenvatting van de oppervlakte en het percentage inwoners en kinderen tussen 0 en 19 jaar die in Vlaanderen blootgesteld worden aan een B-veld van minimum 0,4 μ T. Voor de kinderen tussen 0 en 19 jaar wordt een onderscheid gemaakt tussen het percentage blootgesteld t.o.v. de Vlaamse bevolking en t.o.v. het totaal aantal kinderen in deze leeftijdscategorie.

Tabel 177: Blootstellingen binnen de 0,4 μ T contour in Vlaanderen

Werkings- capaciteit	Blootstelling van	Lijntype			Totaal
		70 kV	150 kV	380 kV	
25%	- oppervlakte (km ²)	1,25	1,55	0,65	3,5
	- aantal woningen	2914	3885	1700	8498
	- % inwoners	0,12	0,16	0,07	0,35
	- % kinderen tss 0-19j(1)	0,03	0,04	0,01	0,08
	- % kinderen tss 0-19j(2)	0,12	0,16	0,07	0,35
50%	- oppervlakte (km ²)	2,50	3	1,3	7
	- aantal woningen	5827	7769	3399	16996
	- % inwoners	0,25	0,31	0,13	0,7
	- % kinderen tss 0-19j(1)	0,06	0,07	0,03	0,16
	- % kinderen tss 0-19j(2)	0,25	0,31	0,13	0,7
75%	- oppervlakte (km ²)	3,7	4,7	2	10,5
	- aantal woningen	8741	11654	5099	25494
	- % inwoners	0,38	0,48	0,20	1,06
	- % kinderen tss 0-19j(1)	0,09	0,11	0,05	0,24
	- % kinderen tss 0-19j(2)	0,38	0,48	0,20	1,06
100%	- oppervlakte (km ²)	5	6,2	2,6	14
	- aantal woningen	11654	15539	5099	25494
	- % inwoners	0,5	0,63	0,26	1,4
	- % kinderen tss 0-19j(1)	0,11	0,14	0,06	0,3
	- % kinderen tss 0-19j(2)	0,5	0,63	0,26	1,4

- % kinderen tss 0-19j(1): % berekend op aantal inwoners in Vlaanderen

- % kinderen tss 0-19j(2): % berekend op aantal kinderen tussen 0 en 19 jaar in Vlaanderen

Omdat het NIS-INS (2003) alleen over de bevolkingsstatistieken beschikt voor kinderen tussen 0 en 19 jaar werden geen blootstellingpercentages berekend voor de epidemiologisch gevoeligste leeftijdsklasse, nl. tussen 0 en 15 jaar. In de veronderstelling dat deze leeftijdsklasse op dezelfde manier verspreid is dan de categorie kinderen tussen 0 tot 19 jaar zijn de gegevens van tabel 17 goede schatters van het blootstellingpercentage voor de kinderen tussen 0 en 15 jaar. Uitgaande van het relatief risico van 2 voor de associatie tussen de blootstelling aan gemiddeld 0,4 μ T en kinderleukemie wat overeenkomt met 2 tot 3 extra leukemiegevallen per 100 000 blootgestelde kinderen (tussen 0 en 15 jaar) per jaar (van der Plas et al., RIVM-rapport, 2001) berekenden we dat in Vlaanderen maximaal 0,55 leukemiegevallen per jaar (of ongeveer 1 om de 2 jaar) door blootstelling aan het magnetisch veld van hoogspanningslijnen zouden bijkomen. Deze extra incidentie is vergelijkbaar met de schatting in Nederland die uitwijst dat minder dan 1 kind op 110 nieuwe gevallen van kinderleukemie per jaar bijkomt door blootstelling aan het magnetisch veld van hoogspanningslijnen (van der Plas et al., EBEA-2001). De schattingen zijn slechts geldig indien er een verband bestaat tussen oorzaak en gevolg. In Vlaanderen werden voor de perioden 1997, 1998 en 1999 respectievelijk 48, 43 en 48 leukemiegevallen voor kinderen tussen 0 en 15 jaar geregistreerd: de cijfers zijn de som van de frequenties van lymfatische leukemie, myeloïde leukemie, monocytair leukemie en leukemie overige (Van Eyken, 2002).

2.5.2 Onzekerheid op schatting

De onzekerheid op de blootstellingsstatistieken die in tabel 17 gegeven worden is hoofdzakelijk toe te schrijven aan:

- nog onvoldoende representatieve statistieken over de variërende stroombelasting van het hoogspanningsnet
- nog te weinig inzicht in de clusterspreiding van de woningen en de bevolking rond het hoogspanningsnet
- nog onvoldoende kennis over de bevolkingsdichtheid in de bebouwde kommen die door het hoogspanningsnet doorkruist worden.
- geen gegevens over de bevolkingsdichtheid van kinderen tussen 0 en 15 jaar

Om de betrouwbaarheid van de berekeningen te verhogen moet men dus beschikken over de representatieve tijdspercentielen die de duur van de werkingscapaciteit (stroombelasting) per lijnverbinding (iedere hoogspanningslijn wordt geïdentificeerd door o.a. een lijnnummer) aangeeft. Bovendien zou de geografische lengte van het boven- en ondergronds net dat de bebouwde kommen kruist en de bevolkingsdichtheid van de bebouwde kommen accuraat moeten bestudeerd worden. De nauwkeurigste, maar tevens de duurste, methode hiervoor is het tellen van het aantal woningen (in al haar varianten) en het aantal inwoners (per leeftijdscategorie) dat zich in de 0,4 μ T contour van elk lijntype bevindt. Deze tellingen zouden geïntegreerd kunnen worden in o.a. de statistische sectoren waarmee, indien het in het kader van ruimtelijke ordening en volksgezondheid nodig zou zijn, aan blootstellingsplanning kan gedaan worden op gemeentelijk, provinciaal en regionaal vlak.

Besluit deel 2

Dat men in het buitenland steeds meer overweegt om in de ruimtelijke ordening de 0,4 μ T risicocontour als criterium voor blootstellingspreventie te gebruiken wordt aangetoond door het RIVM rapport (Kelfkens et al., 2003) i.v.m. "Plannen voor nieuwbouwwoningen bij bovengrondse hoogspanningslijnen". Op grond van het voorzorgsprincipe overweegt de Nederlandse overheid de blootstelling van de bevolking aan het B-veld afkomstig van bovengrondse hoogspanningslijnen te reduceren. Het meest relevante gegeven uit de Nederlandse studie dat betrekking heeft op de resultaten van tabel 17 is dat in 2000 in Nederland 23.000 woningen binnen de 0,4 μ T contour stonden die berekend was op de 50^{ste} percentielwaarde van de werkingscapaciteit van de bovengrondse luchtlijnen. Het 50^{ste} percentiel van de werkingscapaciteit (wkc 50%) voor Vlaanderen (tabel 17) daarentegen toont aan dat 17.000 woningen binnen deze contour vallen. Daarenboven is de woningsdichtheid in Nederland⁴ 203/km², in Vlaanderen 180/km² en de verhoudingsfactor (203/180) van beiden 1,13. Deze factor is vergelijkbaar met factor van 1,35 (23.000/17.000) die de verhouding van het aantal woningen binnen de 0,4 μ T contour tussen Nederland en Vlaanderen weergeeft. Wanneer bovendien rekening gehouden wordt met het uitgebeid aantal variabelen dat bij deze rekenmethoden een rol speelt, kan men stellen dat er een vrij goede overeenkomst bestaat tussen de resultaten (en aldus de methodologie) van Vlaanderen en Nederland.

In het kader van het voorzorgsprincipe (tot nu toe is geen bewijs geleverd tussen oorzaak en gevolg) zou de Vlaamse overheid kunnen overwegen of het 0,4 μ T contourcriterium een doeltreffend instrument is om de blootstelling van de bevolking aan het magnetisch veld van hoogspanningslijnen te reduceren. Uiteraard moet hier rekening gehouden met de alle mogelijke socio-economische en ecologische implicaties. Indien de overheid tot dergelijke beslissing zou

⁴ Nederland heeft 16,2.10⁶ inwoners op een oppervlakte van 3,4.10⁴ km² (Kelfkens et al., RIVM 2003), de bevolkingsdichtheid is 480/km² (CBS, 2003) en het aantal gezinsleden per woning is 2,37. Vlaanderen heeft ongeveer 6.10⁶ woningen op 1,35.10⁴ km², een bevolkingsdichtheid van 442/km² en een aantal gezinsleden van 2,46 per woning (NIS 2002).

overgaan vormt deze bescheiden studie alvast een belangrijke schakel in het gehele implementatieproces.

REFERENTIES

Ahlbom, A., Day, N., Feychling, M., Roman, E., Skinner, J., Dockerty, J., Linet, M., McBride, M., Michaelis, J., Olsen, J.H., Tynes, T. and Verkasalo, P.K. (2000), A pooled analysis of magnetic fields and childhood leukemia. *British Journal of Cancer*, 83(5), pp. 692-698.

CBS (2003 Centraal Bureau voor de Statistiek Nederland. <http://www.cbs.nl/>

CIRC/IARC. (2001), Centre Internationale de Recherche sur le cancer. Le CIRC met en evidence des indications limitées selon lesquelles les champs magnetiques domestique accroissent le risque de leucémie chez l'enfant. Communiqués de press du CIRC, Lyon (France), 27 juin 2001.

CPTe, Electrabel, SPE (1997), Hoogspanningsverbindingen en elektromagnetische effecten. Publicatie uitgeven onder verantwoordelijkheid van André Pauquet in samenwerking met Tractebel Engineering en Laborelec. p. 1 – 49.

CSTEE (2001), http://europe.eu.int/comm/food/fs/sc/sct/out128_en.pdf

CSTEE (2002) http://europe.eu.int/comm/food/fs/sc/sct/out161_en.pdf

Decat G. (1993), Bronnen, normen en meetmethoden van 50/60 Hz elektrische en magnetische velden. Vito-rapport ENE.RA9318.

Decat G., Kerckhofs R., Malfait A., Belmans R. (1995) Deel 1: Evaluatie van 50 Hz elektrisch en magnetische velden door middel van puntmetingen, continuummetingen en dosimetrie. Deel 2: Modellisering van de elektrische en magnetische velden van een 150 kV-lijn. Vito-rapport, ENE.RA9505.

Decat G. and Van Tongerloo J. (1998), Magnetic field monitored in houses under 50 Hz high-voltage transmission lines of 70, 150, 220 & 380 kV. *Air Pollution VI*, Editors: C.A. Brebbia, C.F. Ratto, H.Power, TM WITPress Computational Mechanics Publications Ed, 237 – 246..

Decat G. and Van Tongerloo J. (1998), Monitoring of the Magnetic Fields in Houses under High-Voltage Overhead Transmission Lines of 150, 220 and 380 kV. *International Journal of Environment Pollution*, Vol. 9, nr. 4, 341-35.

Decat G. en Van Tongerloo J. (1998), Monitoring van het magnetisch veld in woningen onder de Belgische hoogspanningslijnen met bedrijfsspanning van 70, 150, 220 & 380 kV. *Energie & Milieu* nr. 2 - maart/april

Decat, G., Lambert, B. and De Rijck K. (2000), Static and alternating 50 Hz Magnetic Fields in our Living and Working Environments. Vito Conference Proceedings on 'Safety in living and working environments: promotion of a network for the study of risk factors'. Organized by: Italian Embassy in Belgium, Vito, ISPESL, IST. pp. 31-33, December 15th, 2000.

Decat G., (2001), Relative exposure index for the relation between the personal and the stationary home magnetic field exposure close to and far away from power lines. *EBEA-2001 Proceedings*, pp. 136-139, September 2001 .

Decat, G., (2002) Representativeness of 24 h and 48 h measurements of the magnetic field exposure for epidemiological purposes and the ratio between the dynamic and static exposure for people living below high voltage transmission lines. *Piers 2002 Proceedings, Progress in Electromagnetic Research Symposium*, July 1-5, 2002, Cambridge, Massachusetts, USA, Published by the Electromagnetic Academy, Cambridge USA, p. 691

Decat G. (2002), Elektrisch en magnetisch veld van 380 kV, 150 kV en 70 kV hoogspanningslijnen in Vlaanderen. Vito-rapport 2002/IMS/R/012

Decat G. Crasson M., Peeters E. and Van Loock W. (2003), Optimal sampling time for the exposure assessment of the magnetic field for epidemiological purposes. Ingediend voor Internationaal EBEA-congres 2003.

Dorf R.C. (1997), Electromagnetics. Electrical engineering handbook (2nd edition). CRC Press London, UK – ISBN 0-8493-8574. p. 887 – 912.

MIRA 2001: Decat G., De Ridder M. en Verschaeve L. (2001), Niet-ionsierende straling: achtergronddocument van het MIRA-rapport: http://www.vmm.be/pdf/ag_2.22.pdf, Vlaamse Milieumaatschappij (VMM), december 2001.

MIRA-T 2001: De Ridder M., Decat G., en Verschaeve L. (2001), Niet-ioniserende straling: Het MIRA-T2001 rapport: <http://www.vmm.be/pdf/2.22.pdf>, Vlaamse Milieumaatschappij (VMM), december 2001

Elia (2002), Geografische lengte van Belgische hoogspanningslijnen. Activiteitenverslag/Jaarverslag 2002: energie in goede banen. (<http://www.elia.be>).

Elia (2003a), Niet-gepubliceerde gegevens (distribution monotone rel.xls) over de lijnbelastingen voor de periode van 1 jaar (2000 – 2001).

Elia (2003b), Niet-gepubliceerde gegevens i.v.m. met de karakteristieken van de luchtlijnen in Vlaanderen (document infrastructuur).

Elia (2003c), Dimension type des lignes HT en Belgique (configuration double drapeau).

Elia (2003d) Folder: energie in goede banen.

EPS (1992), Numerical modeling of electromagnetic fields (1th part). Journal de physic, Vol. 2, no 11, 1970-1977.

EPS (1993), Numerical modeling of electromagnetic fields (2nd part). Journal de physic, Vol. 3, no 3, 363-371.

Hameyer K., Malfait A., Mertens R., Belmans R. (1995), Berekening van Elektrische en Magnetische Velden van Hoogspanningslijnen. Les champs électromagnétiques à basse fréquence dans l'environnement. Etat actuel de la question. Symposium 18 octobre 1995. Service d'Electricité Appliquée (ELAP) – Université de Liège.

Hoeffelman, Decat G., Lilien J-L. (2003), Assessment of the Electric and Magnetic field levels in the vicinity of the HV overhead power lines in Belgium. Ingediend bij Cigré.

IEEE (2002/2003), The Precautionary Principle. IEEE Technology and Society Magazine, Vol. 21, nr 4, Winter 2002/2003. p. 1 – 48.

Kelfkens G., Pennders RMJ en Pruppers MJM. (2003), Plannen voor nieuwbouwwoningen bij bovengrondse hoogspanningslijnen. RIVM rapport 610150004/2003.

Kong J.A. (2000), Electromagnetic Wave Theory. ISBN 0-9668143-9-8. EMW Publishing, USA.

Kraus J. D. Electromagnetics (1991), 4th edition, international edition 1991, McGraw Hill, ISBN 0-07-112666-X, printed in Singapore.

Microwave News (2003) WHO Invokes Precautionary Principle for High and Low-Frequency EMFs. Microwave News March/April 2003

MIRA (2001), Milieu- en natuurrapport Vlaanderen, Achtergronddocument 2001, 2.22 | Niet-ioniserende straling, Decat G., De Ridder M., Verschaeve L., Bossuyt M., Vlaamse Milieumaatschappij, www.milieurapport.be

Nationaal Instituut voor de Statistiek (NIS): http://statbel.fgov.be/home_nl.htm

NIS-enquête, 2001: http://statbel.fgov.be/census/localres04_nl.asp

NIS Kerncijfers 2002: http://statbel.fgov.be/downloads/key2002_nl.pdf

Pirotte P. (1995), Champs électrique et magnétique dans notre environnement – Reflexion et campagne de mesure. Les champs électromagnétiques à basse fréquence dans l'environnement. Etat actuel de la question. Symposium 18 octobre 1995. Service d'Electricité Appliquée (ELAP) – Université de Liège.

Statistica (edition 1999)

van der Plas M. et al. (2001), Magnetische velden van hoogspanningslijnen en leukemie bij kinderen. RIVM-rapport 610050 007 april 2001.

van der Plas M., Houthuis DJM, Dusseldorp A., Pennders RMJ, Pruppers MJM. (2001) Exposure to the magnetic fields from overhead power lines and childhood leukemia in the Netherlands. EBEA 2001, 5th international Congress of the European BioElectromagnetic Association (EBEA) 6-8 September 2001, Helsinki, Finland: Proceedings.

Van Dommelen D. (1994), Lijnen en Netten, Faculteit Toegepaste Wetenschappen, Katholieke Universiteit Leuven.

Van Eycken E. (2002), Kankerincidentie in Vlaanderen. Vlaams Kankerregistratienetwerk (http://www.tegenkanker.net/KiVdoc1_v7.pdf). D/2002/9738/1. Vlaamse Liga tegen kanker. Koningsstraat 217, 1210 Brussel. Pdf's van tabellen met incidentiecijfers 1997-1999: <http://www.tegenkanker.net/Media/Sterk.604/Tabel%205.1%20M-abs-99.pdf>

Van Loock W. (1999), Gezondheid en Elektromagnetisme. Niet-ioniserende straling (NIS). Academic Press – Gent, 1 – 182.

Vining, G.G. (1998), Statistical Methods for Engineers. Cole Publishing Compagny. A division of Int. Thomsom Publising Inc. ISBN 0-534-23706-1