



Vlaanderen
is omgeving

Validatie van een rekenmodel voor de berekening van magnetische velden nabij hoogspanningslijnen



Depotnummer
D/2023/3241/255

Wijze van citeren

Verlaek M., Gommé L., Goethals M., Van Hoof T., De Kempeneer N., De Mulder S., Van Campenhout K. (2023), *Validatie van het rekenmodel voor de berekening van magnetische velden nabij hoogspanningslijnen.*

PARTNERS



INHOUDSTAFEL

Afkortingen	5
Opbouw van het rapport	6
1 Inleiding	7
1.1 Aanleiding	7
1.2 Aanpak	7
1.3 Wat zijn Magnetische velden en limietwaarden voor blootstelling	8
2 Rekenimplementaties van Departement Omgeving voor de magnetische veld berekening	10
3 Vergelijking tussen model en metingen.....	11
3.1 Introductie	11
3.2 Opzetten van de veldmetingen	11
3.2.1 Selectie van de meetsites	11
3.2.2 Meetapparatuur	14
3.2.3 Meetmethode	15
3.3 Onzekerheden in de vergelijking tussen model en meting	16
3.3.1 Vergelijking tussen de twee meettoestellen voor magnetische velden	16
3.3.2 Onzekerheden te wijten aan locatiebepaling met behulp van GPS	17
3.3.3 Onzekerheden te wijten aan geometrische karakteristieken	18
3.3.4 Onzekerheden te wijten aan de gerapporteerde stroombelasting	18
3.3.5 Conclusie inzake onzekerheden in de vergelijking tussen model en meting	18
3.4 Vergelijking tussen de gemeten en de gemodelleerde veldwaarden	19
3.4.1 Metingen en berekeningen voor Damme (380kV Stevin lijn)	19
3.4.2 Metingen en berekeningen voor Harelbeke (380kV lijn Avelgem-Izegem)	21
3.4.3 Metingen en berekeningen voor Evergem (150kV lijn tussen Langerbrugge-Brugge)	24
3.5 Conclusie vergelijking van gemeten en gemodelleerde veldwaarden	25
4 Vergelijking met een onafhankelijk model	26
4.1 Introductie	26
4.2 Vergelijking tussen de gemodelleerde veldwaarden	26
4.2.1 De compacte vakwerkmast	27
4.2.2 De CompactLine	28
4.2.3 De wintrack	29
4.2.4 Vergelijking tussen alle berekende masttypes	30
4.3 Conclusie modelvalidatie met behulp van onafhankelijk model	31
5 Besluit	32
Referenties.....	33

AFKORTINGEN

CAD	Computer Aided Design
DOMG	Departement Omgeving
EHP	Electric and Magnetic Field Probe Analyzer
ELF	Extreem Lage Frequentie
ELT	Exposure Level Tester
EMF	Electro Magnetic Field
EPRI	Electric Power Research Institute
GIS	Geografisch Informatie Systeem
Gmsh	Open source mesh generator
GPS	Global positioning system
GRB	Grootschalig Referentiebestand
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
QGIS	Quantum-GIS: open source geografisch informatiesysteem (GIS)
Vlarem	Vlaams Reglement betreffende de Milieuvergunning



OPBOUW VAN HET RAPPORT

Dit rapport bestaat uit 5 delen. Het **inleidende deel** bespreekt het nut van deze studie, namelijk nagaan of het rekenmodel dat Departement Omgeving gebruikt, de werkelijke blootstelling voldoende nauwkeurig benadert. Daarnaast geeft het kort de globale aanpak weer en biedt het achtergrondinformatie over magnetische golven afkomstig van hoogspanningslijnen.

Het **tweede deel** behandelt het rekenmodel dat Departement Omgeving gebruikt, met een bespreking van de twee verschillende implementaties. Met deze implementaties is Departement Omgeving in staat om de blootstelling langs volledige trajecten met hoogspanningslijnen te berekenen.

Deel drie gaat over de vergelijking van het rekenmodel van Departement Omgeving en de veldmetingen op drie aparte locaties, die een gevarieerde set aan meetlocaties opleverde en die het hoogspanningsnet in Vlaanderen gepast vertegenwoordigen. Naast de bespreking van het opzetten van de veldmetingen, en resultaten, gaat er ook aandacht naar de onzekerheden in bepaalde omstandigheden en input-gegevens. Hierdoor kunnen er verklaarbare en aanvaardbare verschillen optreden tussen de resultaten van het model en de metingen.

Deel vier vertrekt van de berekeningen van een commercieel rekenmodel en vergelijkt die met de berekeningen van het rekenmodel dat bij Departement Omgeving gebruikt wordt. Er worden 7 verschillende masttypes vergeleken.

Tot slot eindigen we **in deel vijf** met een aantal conclusies.

1 INLEIDING

1.1 AANLEIDING

Hoogspanningslijnen vervoeren elektriciteit van productiecentrales naar grote industriële verbruikers en distributienetbeheerders, die uiteindelijk de elektriciteit verder verdelen naar de huishoudens en andere vragers. Wanneer er elektrische stroom door de geleiders van hoogspanningslijnen loopt, ontstaan er magnetische en elektrische golven met een extreem lage frequentie (ELF).

Doorheen de jaren krijgt Departement Omgeving regelmatig vragen over de blootstelling aan magnetische velden. Daarom is Departement Omgeving (DOMG) in 2017 gestart met de ontwikkeling van een rekentoepassing voor de magnetische velden die afkomstig zijn van hoogspanningslijnen. Aangezien het niet haalbaar is om voor Vlaanderen de blootstelling op te meten in de buurt van alle hoogspanningslijnen biedt een rekenmodel een degelijk alternatief.

De mogelijkheid om de blootstelling te berekenen laat Departement Omgeving toe om onderbouwd en transparant te communiceren. Zo kunnen we op vragen van burgers en andere betrokken actoren antwoorden, wat bijdraagt tot het wegnemen van ongerustheid. Wanneer omwonenden van een hoogspanningslijn willen weten wat de blootstelling aan magnetische velden is, kunnen ze een berekening bij Departement Omgeving aanvragen. Die blootstelling wordt met behulp van het rekenmodel bepaald. Op een onafhankelijke manier maakt Departement Omgeving de blootstelling voor omwonenden op deze manier inzichtelijk.

1.2 AANPAK

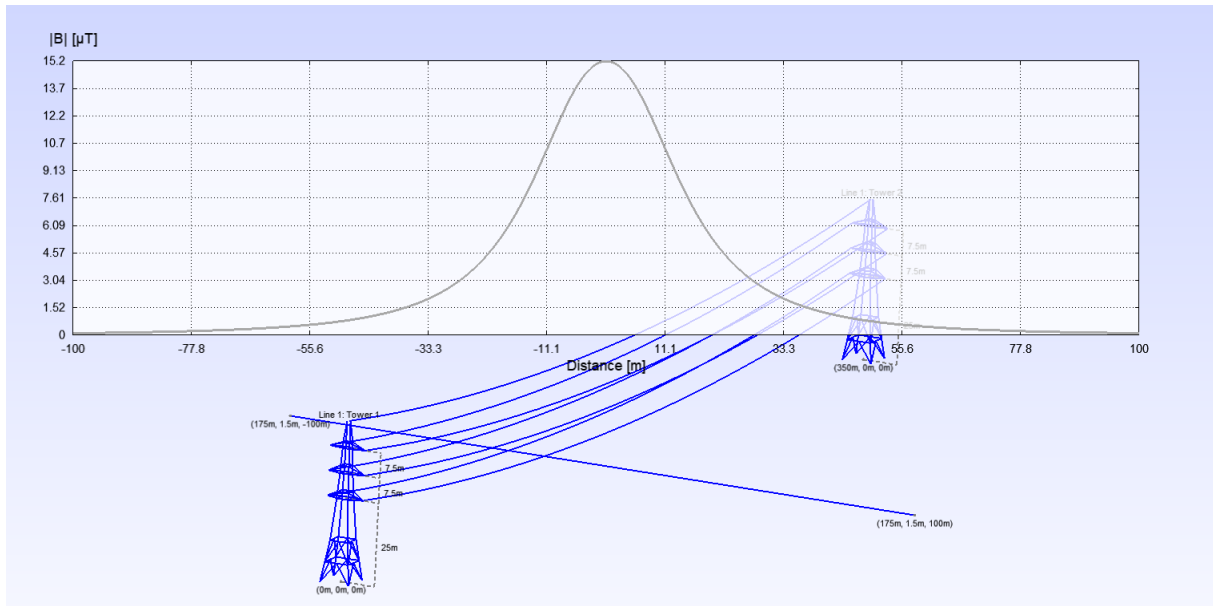
Het doel van deze studie is om na te gaan of de berekeningen van magnetische velden door hoogspanningslijnen aan de hand van het rekenmodel gebruikt bij DOMG voldoende nauwkeurig de werkelijke blootstelling benaderen. Wanneer het rekenmodel succesvol gevalideerd wordt, kan Departement Omgeving het inzetten voor nauwkeurige blootstellingsbepaling aan ELF daar waar metingen niet altijd mogelijk zijn.

Om te onderzoeken of de berekeningen van het rekenmodel een degelijk alternatief bieden voor veldmetingen, worden verschillende vergelijkingen gemaakt via: (1) metingen van het veld nabij hoogspanningslijnen en (2) berekeningen door een ander en onafhankelijk rekenmodel. Dankzij deze tweeledige vergelijking zal het rekenmodel gebruikt bij DOMG op een solide wijze geëvalueerd worden. Dit opzet wordt geschetst in de schematische voorstelling in **Figuur 1**. Het rekenmodel, dat we wensen te vergelijken, werd geïntegreerd in 2 rekenimplementaties, nl. de Gmsh implementatie en de Geografisch Informatie Systeem (GIS) implementatie. Deze twee implementaties gebruikt DOMG om magnetische velden te berekenen nabij hoogspanningslijnen.

We starten met de vergelijking tussen de berekeningen door het rekenmodel dat DOMG gebruikt en de metingen. We selecteren daarvoor drie meetsites in Vlaanderen waar de WAVES onderzoeksgroep van het departement Informatie Technologie van de Universiteit Gent en IMEC veldmetingen hebben uitgevoerd. Het gaat om locaties in Damme, Harelbeke-Deerlijk en Evergem.

Omdat de stroombelasting een onontbeerlijke inputparameter is voor het rekenmodel maken we hiervoor gebruik van metingen van de stroombelasting op de dag van de meting voor de opgemeten hoogspanningslijnen. Netbeheerder Elia stelde deze gegevens ter beschikking. Ook volgende gegevens worden ingevoerd in het rekenmodel: geometrieën (configuratie hoogspanningsmasten,

Het magnetisch veld dat gegenereerd wordt op een punt in de omgeving van de hoogspanningslijn, is afhankelijk van de sterkte van de stroom die door de geleiders vloeit, de afstand tot de geleiders en de configuratie van masten en geleiders. De waarde van het magnetisch veld neemt snel af naarmate de afstand tot de geleiders toeneemt (**Figuur 2**).



Figuur 2: Simulatievoorbeeld ter illustratie van de afname van het magnetisch veld $B[\mu\text{T}]$ onder een hoogspanningslijn, berekend door DOMG met behulp van de gmsH rekenimplementatie van de Universit  de Liège (Geuzaine and Remacle 2009; Geuzaine et al. 2012).

Er gelden richtlijnen en aanbevelingen om de grootte van het magnetisch veld, die de elektrische stroom veroorzaakt, te beperken. Deze situeren zich zowel op internationaal, Europees en gewestelijk vlak **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**, [4][5].

In Frankrijk, Duitsland en het Verenigd Koninkrijk is de limietwaarde voor acute blootstelling gelijk aan $100 \mu\text{T}$. Dit is in lijn met de Europese aanbeveling 1999/519 die gebaseerd is op de aanbevelingen van ICNIRP in 1998. In Nederland zijn er geen bindende nationale grenswaarden voor magnetische velden.

In Vlaanderen loopt er op dit moment een wetgevingstraject om een norm van $100 \mu\text{T}$ voor acute blootstelling op te nemen in Vlarem. Er wordt een bindend afsprakenkader uitgewerkt om langdurige (chronische) blootstelling aan magnetische velden van meer dan $0,4 \mu\text{T}$ zoveel mogelijk te beperken.

Eenheden en prefixen

V	Volt	Elektrische spanning
E	Volt/m	Elektrisch veld

k	kilo	10^3
μ	micro	10^{-6}

A	Ampère	Stroomsterkte
A/m	Ampère/m	Magnetische veldsterkte
T	Tesla	Magnetische inductie

Hz	Hertz	Frequentie
----	-------	------------

3 VERGELIJKING TUSSEN MODEL EN METINGEN

3.1 INTRODUCTIE

In dit hoofdstuk bespreken we de eerste vergelijking tussen de berekeningen van het magnetische veld aan de hand van het rekenmodel dat DOMG gebruikt en de metingen van het veld nabij hoogspanningslijnen. We schetsen eerst het opzetten van de veldmetingen met de selectie van drie meetsites in Vlaanderen, de keuze van de meetapparatuur en de gevolgde meetmethode. Vervolgens overlopen we de onzekerheden in de vergelijking tussen model en meting waarmee we rekening moeten houden. Tenslotte maken we de vergelijking tussen de gemodelleerde en gemeten waarden en bespreken we de resultaten.

3.2 OPZETTEN VAN DE VELDMETINGEN

Op drie locaties in Vlaanderen werden metingen nabij hoogspanningslijnen uitgevoerd door de WAVES onderzoeksgroep van het departement Informatie Technologie van de Universiteit Gent en IMEC.

De locaties worden in detail besproken in paragraaf 3.2.1. De metingen werden uitgevoerd met de apparatuur beschreven in paragraaf 0 en volgens de meetprocedure in paragraaf 0.

3.2.1 Selectie van de meetsites

Er werden op volgende drie locaties in Vlaanderen metingen uitgevoerd: Damme (3.2.1.1), Harelbeke - Deerlijk (3.2.1.2) en Evergem (3.2.1.3).

Voor de opgemeten hoogspanningslijnen is de configuratie van de masten digitaal beschikbaar bij DOMG. Met deze digitale gegevens kunnen de rekenimplementaties achteraf de velden berekenen. Verder werden meetsites geselecteerd nabij zowel 380kV als 150kV hoogspanningslijnen zodat trajecten met verschillende stroombelasting meegenomen worden in deze studie, alsook trajecten die al dan niet uitgerust zijn met de nieuwste types geleiders en met fasen in transpositie³. Op deze manier komen we tot een gevarieerde set meetlocaties die het hoogspanningsnet in Vlaanderen gepast vertegenwoordigen. Ook de toegankelijkheid van de meetlocatie speelde een rol in de selectie van de meetsites aangezien de meetopstelling vlot geplaatst moet worden op verschillende afstanden tot de lijn. De metingen werden uitgevoerd tijdens de kantooruren op werkdagen.

Bovendien worden metingen van de stroombelasting op de dag van de meting voor de opgemeten hoogspanningslijnen ter beschikking gesteld door de netbeheerder omdat deze noodzakelijk zijn om in te voeren in het rekenmodel.

Het [Grootschalig Referentiebestand](#) (GRB) is een digitale topografische referentiekaart van Vlaanderen en wordt gebruikt als geografische basis bij de berekeningen. Een kaartlaag in GIS met de hoogspanningslijnen in Vlaanderen wordt ons ter beschikking gesteld door de netbeheerder.

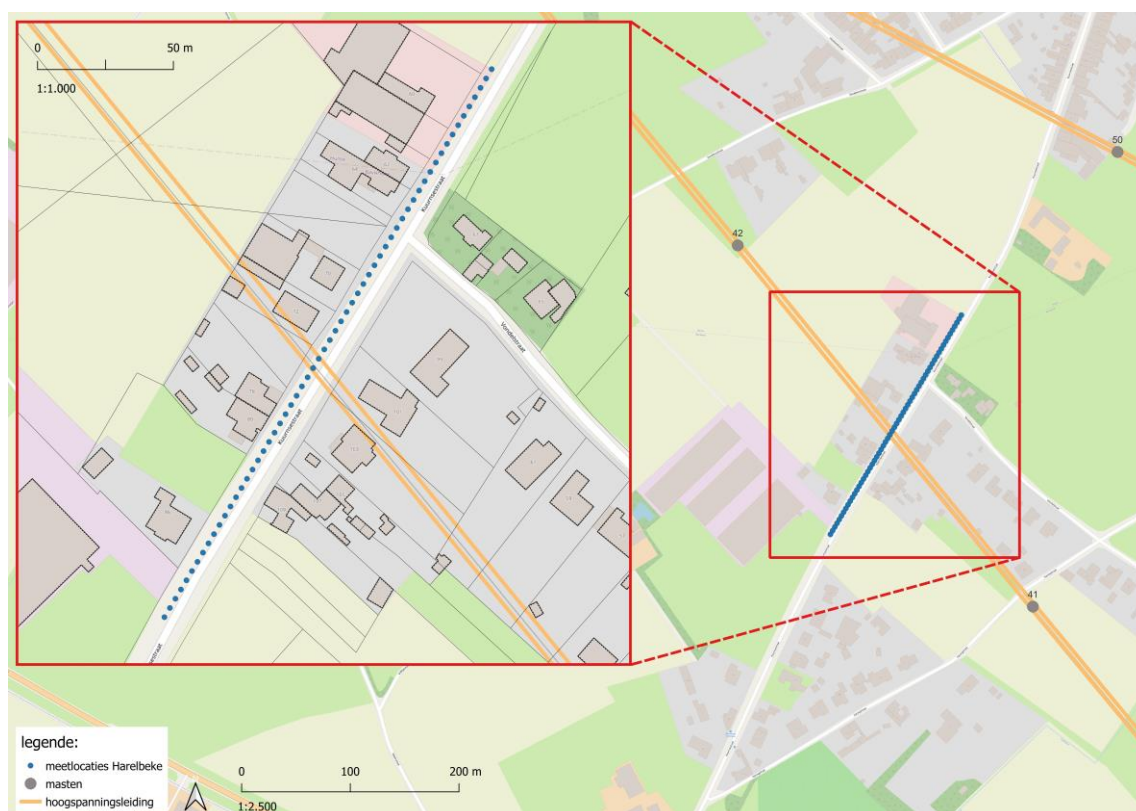
³ Transpositie is de optimalisering van de fasen in de verschillende circuits van een hoogspanningslijn om de magneetveldzone te verminderen.

3.2.1.2 Harelbeke en Deerlijk (380kV lijn Avelgem-Izegem)

Ook hier wordt in de meetdata gezocht naar een sequentie aan posities waarvoor de gerapporteerde stroombelasting geen grote fluctuaties vertoont. Dit leidt tot de selectie van metingen langs de Kuurnestraat in Harelbeke tussen mast 41 en 42 in **Figuur 4** waarvoor de stroombelasting constant is tijdens het onderzochte meetvenster.

Bovendien varieerde de stroombelasting tussen de circuits onderling voor hetzelfde meetvenster minder dan 1%.

De sequentie aan posities is - in de mate van het mogelijke - ook zo gekozen dat de posities quasi loodrecht op de richting van de hoogspanningslijn liggen om het verloop van hoge naar lage veldwaarden mee te nemen in de vergelijking. De weerhouden metingen worden opgesteld in **Tabel 2**.



Figuur 4: 380kV lijn tussen Avelgem-Izegem ter hoogte van de meetlocaties in Harelbeke en Deerlijk

	Harelbeke en Deerlijk (380kV lijn Avelgem-Izegem)	
	Harelbeke – Kuurnestraat in noordoostelijke richting	Harelbeke – Kuurnestraat in zuidwestelijke richting
Aantal posities	28	32
Gemeten tijdstip	11:34 - 11:47	11:47 - 11:55
Stroombelasting per circuit (Ampère)	147.9/147.9	147.9/147.9

Tabel 2: Weerhouden metingen bij 380kV lijn tussen Avelgem-Izegem

Figuur 8: De afwijking in dB tussen het magnetisch veld gemeten op de 5 punten volgens in **Figuur 7**.

3.3.3 Onzekerheden te wijten aan geometrische karakteristieken

Bij het berekenen van de magnetische velden met Gmsh en GIS worden verschillende geometrische karakteristieken van pylonen en geleiders en gegevens van de overspanning ingevoerd.

Wanneer deze karakteristieken niet nauwkeurig gekend zijn, kunnen ze een vertekend beeld geven van de gesimuleerde blootstelling.

Enkele voorbeelden van deze karakteristieken zijn,

- De mate van doorhangen van de geleiders;
- De lengte van de armen waaraan de geleiders bevestigd zijn;
- De verticale afstand tussen de geleiders onderling;
- De coördinaten van de pylonen.

In dit rapport simuleren we bovendien met de worst-case doorhang van de geleiders. Dit wil zeggen dat de geleiders op hun laagste punt bij de grond zijn op de positie halverwege tussen twee pylonen, wat zal resulteren in de hoogste waarde qua blootstelling. De temperatuur van de geleiders bepaalt echter het uitzetten of doorhangen en deze temperatuur wordt beïnvloed door de buitentemperatuur en de stroombelasting door de geleiders.

3.3.4 Onzekerheden te wijten aan de gerapporteerde stroombelasting

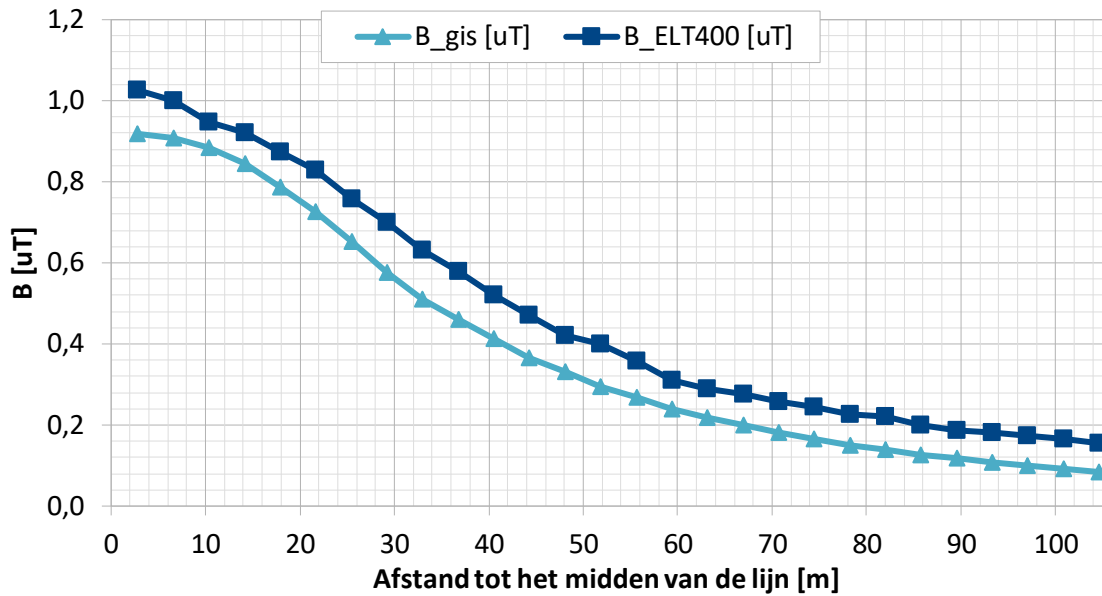
De stroombelasting die ingevoerd wordt in de rekenimplementaties van DOMG wordt slechts per kwartier gerapporteerd. Afhankelijk van de stroomvraag en de stroomproductie kunnen er echter pieken optreden in de vervoerde stroom door de geleiders van hoogspanningslijnen en deze worden niet geregistreerd in de stroomwaarden per kwartier. Dit kan leiden tot een onderschatting van de blootstelling door de rekenimplementaties op het ogenblik van de meting.

Daarom wordt in de meetdata gezocht naar een sequentie aan posities waarvoor de gerapporteerde stroombelasting over de kwartieren heen alvast geen grote fluctuaties vertoont om zo in de mate van het mogelijke stroompieken te vermijden in de geselecteerde metingen en de blootstelling correct te benaderen.

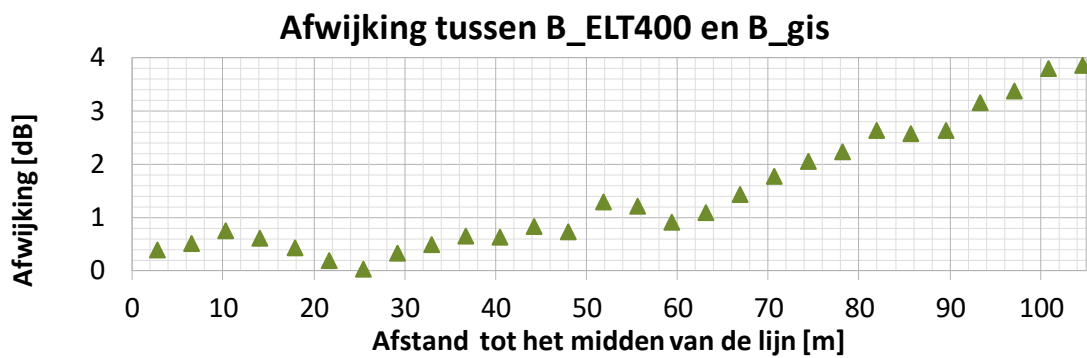
3.3.5 Conclusie inzake onzekerheden in de vergelijking tussen model en meting

Wanneer we een vergelijking wensen te maken tussen de berekende en de gemeten waarden van het magnetisch veld nabij hoogspanningslijnen moeten we dus rekening houden met volgende onzekerheden die kunnen leiden tot een afwijking tussen berekende en gemeten waarde:

- Zo bestaat er een onzekerheid op de gemeten waarde die tot 2dB kan bedragen en die afkomstig is van de keuze van het meettoestel.
- Daarnaast kan er door de onnauwkeurigheid waarmee de meetpositie bepaald wordt een afwijking op de meetwaarde zijn die minstens 1.1dB kan bedragen.
- Bij het berekenen van de magnetische velden met de Gmsh en GIS-rekenimplementaties worden verschillende geometrische karakteristieken van pylonen en geleiders en gegevens van de overspanning ingevoerd. Wanneer deze karakteristieken niet nauwkeurig gekend zijn of er worst-case gerekend wordt, kunnen ze een vertekend beeld geven van de gesimuleerde blootstelling.



Figuur 15: Vergelijking van het gemeten veld B_EL400 met het berekende veld B_gis langs de Kuurnestraat vanaf het midden van de lijn in zuidwestelijke richting



Figuur 16: Afwijking tussen het gemeten veld B_EL400 en het berekende B_gis langs de Kuurnestraat vanaf het midden van de lijn in zuidwestelijke richting

4.3 CONCLUSIE MODELVALIDATIE MET BEHULP VAN ONAFHANKELIJK MODEL

Het rekenmodel dat door Departement Omgeving wordt gebruikt, werd in dit hoofdstuk gevalideerd ten opzichte van een ander onafhankelijk ontwikkeld rekenmodel: EMF-workstation van [EPRI](#).

De afwijking tussen gemodelleerde blootstelling met beide modellen werd bepaald voor 7 verschillende masttypes.

Globaal genomen over deze masttypes heen zien we dat de afwijking tussen beide rekenmodellen bij nominale stroombelasting gemiddeld 0.6dB bedraagt wat op een goede overeenkomst tussen de modellen duidt.



REFERENTIES

- [1] EMF Workstation van Electric Power Research Institute (EPRI), Product ID 1018310, 5 November 2008, <https://www.epri.com/research/products/1018310>
- [2] ICNIRP Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz). Health Phys. 2020 May; 118(5):483-524. doi: 10.1097/HP.0000000000001210.
- [3] ICNIRP guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300GHz) Health Phys. 1998 April, 74(4), 494-522.
- [4] 1999/519/EG: Aanbeveling van de Raad van 12 juli 1999 betreffende de beperking van blootstelling van de bevolking aan elektromagnetische velden van 0Hz - 300GHz, [EUR-Lex - 31999H0519 - EN - EUR-Lex \(europa.eu\)](#)
- [5] [Hoogspanning | Departement Omgeving - Vlaamse overheid \(vlaanderen.be\)](#)
- [6] Geuzaine C., Remacle J.-F. (2009). Gmsh, a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 79(11), 1309-1331.
- [7] Geuzaine C., Henrotte F., Remacle J.-F., Dular P., Sabariego R. (2012). ONELAB: Open Numerical Engineering LABORatory, Proceedings of the 7th European Conference on Numerical Methods in Electromagnetism (NUMELEC2012), July 3-5, 2012.
- [8] ELT-400 Exposure Level Tester, 1Hz-400kHz, ELT-400 (narda-sts.com)
- [9] EHP-50C Compact field analyzer 1Hz-100kHz, opvolger EHP-50F (2404/104) (narda-sts.com)