



Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu
*Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport*

**Validatieonderzoek berekenings-
methodiek magneetveldzone in
Maartensdijk**

RIVM rapport 2014-0133

J.F.B. Bolte et al.



Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu
*Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport*

**Validatieonderzoek
berekenningsmethodiek
magneetveldzone
in Maartensdijk**

RIVM Rapport 2014-0133

Colofon

© RIVM 2014

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), de titel van de publicatie en het jaar van uitgave.

J.F.B. Bolte, Centrum Duurzaamheid, Milieu en Gezondheid
M.A.M. Beerlage, Centrum Duurzaamheid, Milieu en Gezondheid
G. Kelfkens, Centrum Duurzaamheid, Milieu en Gezondheid
M.J.M. Pruppers, Centrum Duurzaamheid, Milieu en Gezondheid

Contact:
Mathieu Pruppers
Centrum Duurzaamheid, Milieu en Gezondheid
mathieu.pruppers@rivm.nl

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van het ministerie van Infrastructuur en Milieu, Directoraat-Generaal Milieu en Internationaal, directie Veiligheid en Risico's in het kader van project 'M/610790/10/HB Elektromagnetische velden'.

Dit is een uitgave van:

**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**

Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven
www.rivm.nl

Publiekssamenvatting

Validatieonderzoek berekeningsmethodiek magneetveldzone in Maartensdijk

Sinds 2005 hanteert de Nederlandse overheid uit voorzorg bij bovengrondse hoogspanningslijnen een berekende magneetveldzone. Ze adviseert om ervoor te zorgen dat in nieuwe situaties binnen deze zone zo weinig mogelijk woningen, scholen, crèches en kinderdagopvangplaatsen komen te liggen. Uit een validatieonderzoek van het RIVM blijkt dat de resultaten van het *rekenmodel* waarmee de magneetveldzone wordt bepaald, overeenkomen met resultaten op basis van *metingen*. Het rekenvoorschrift is daarom goed te gebruiken om te bepalen waar de zonegrens ligt.

De magneetveldzone voor bovengrondse hoogspanningslijnen is het gebied nabij een hoogspanningslijn waarin het magneetveld gemiddeld over een jaar, nu en in de toekomst, sterker kan zijn dan 0,4 microtesla, de maat voor de sterkte van het magneetveld. Vanwege de onzekerheden die met berekeningen gepaard gaan, accepteert het ministerie van Infrastructuur en Milieu (IenM) in de praktijk een afwijking van maximaal 5 meter in de ligging van de zonegrens. De onzekerheden die in het validatieonderzoek in Maartensdijk zijn geconstateerd, vallen binnen deze marge.

Aanleiding voor dit onderzoek waren twijfels over de kwaliteit van de berekeningen bij sommige mensen die veronderstellen dat metingen betrouwbaarder zijn dan berekeningen ('meten is weten'). Metingen kennen echter ook onzekerheden. Bovendien hebben berekeningen als voordeel dat kan worden uitgegaan van de maximale stroom die in de aangereikte rekenwijze voor de magneetveldzone is vastgelegd. Op die manier is rekening gehouden met de toenemende hoeveelheid stroom in de toekomst. De metingen kunnen uiteraard alleen worden uitgevoerd bij de - doorgaans lagere - huidige stroom.

Voor het validatieonderzoek is gedurende 24 uur het magnetisch veld gemeten in de buurt van een hoogspanningslijn in Maartensdijk. In dit rapport staan de meetprocedure, analyse en resultaten beschreven. Het onderzoek is in opdracht van het ministerie van IenM uitgevoerd.

Trefwoorden: bovengrondse hoogspanningslijnen; magneetvelden; metingen; validatieonderzoek

Abstract

Validation study of the calculation methodology for magnetic field zone in 'Maartensdijk'

Since 2005 the Dutch government uses near overhead power lines, by way of precaution, a calculated magnetic field zone. She advises to take care that in new situations, within this zone as few as possible dwellings, schools, crèches, and day care facilities are situated. From a validation study by RIVM it becomes clear that the results of a model used to determine the magnetic field zone agree with the results from measurements. Therefore, the calculation instructions are well applicable to determine the location of the zone limit.

The magnetic field zone for overhead power lines is the strip of land at both sides of the power line where, now and in the future, the yearly averaged magnetic field can be stronger than 0.4 microtesla, which is the unit for the magnetic field strength. Due to uncertainties in the calculations, the ministry of Infrastructure and the Environment accepts in practice a deviation of 5 meter at the most, in the location of the zone limit. The uncertainties found in the validation study in 'Maartensdijk' are within this margin.

The cause for this study has been the doubts on the quality of calculations by some people who suppose that measurements are more reliable than calculations ('meten is weten'). However, measurements also have uncertainties. Moreover, the advantage of calculations is that one can use the maximum electrical current through the line which is laid down in the calculation instructions. In this way it is taken into account that the current increases in the future. The measurements, of course, can only be performed at the - usually lower - present current.

For the validation study 24 hours measurements of the magnetic fields have been performed near an overhead power line in 'Maartensdijk'. In this report the measurement procedure, the analyses and the results are described. The study is commissioned by the ministry of Infrastructure and the Environment.

Key words: overhead power lines; magnetic fields; measurements; validation study

Inhoudsopgave

	Dankwoord – 8
	Samenvatting – 9
1	Inleiding – 11
1.1	Achtergrond – 11
1.2	Validatieonderzoek – 11
1.3	Vraagstelling – 12
1.4	Leeswijzer – 12
2	Methoden – 13
2.1	Analysemethode – 13
2.2	Meetmethoden – 14
2.2.1	Meetlocatie, positiebepaling en meetperiode – 14
2.2.2	Magneetveldmetingen – 17
2.2.3	Stroommetingen – 18
2.3	Modelberekeningen – 19
2.3.1	Inleiding – 19
2.3.2	Handreikingsprofiel – 19
2.3.3	Gemodelleerd magneetveld bij actuele stroom – 20
3	Resultaten metingen en modelberekeningen – 21
3.1	Beschrijving van de meetresultaten – 21
3.1.1	Magneetveldmetingen – 21
3.1.2	Stroommetingen – 22
3.2	Beschrijving van de resultaten van modelberekeningen – 24
3.2.1	Berekend Handreikingsprofiel – 24
3.2.2	Berekende magneetveldprofielen tijdens meetdag en tijdens het jaar 2012 – 25
3.2.3	Invloed van aannames en vereenvoudigingen in het rekenmodel – 26
4	Vergelijking gemeten en gemodelleerde magneetvelden – 27
4.1	Analyseperiode – 27
4.2	Globale vergelijking gemiddelde magneetvelden en spreiding – 27
4.3	Vergelijking metingen en modelberekeningen – 28
4.4	Betekenis voor specifieke magneetveldzone – 30
5	Discussie – 33
5.1	Vergelijking gemeten en gemodelleerde magneetvelden – 33
5.2	Monitoren van stroombelasting – 34
6	Conclusies – 37
	Referenties – 39
	Bijlage 1 Veldwerkprotocol voor het meten rond hoogspanningslijnen – 41
	Bijlage 2 Configuratiegegevens hoogspanningslijn – 47
	Bijlage 3 Bepaling onzekerheid in meting stroomsterkte – 49
	Bijlage 4 Bepaling van theoretisch onzekerheidsbudget – 57
	Bijlage 5 Bepaling van de onzekerheid in de resultaten van metingen en modelberekeningen in Maartensdijk – 63
	Bijlage 6 Invloed van aannames in de Handreiking op berekende magneetvelden – 71

Dankwoord

Het RIVM dankt de heer T.W.G. Verheul uit Maartensdijk voor het beschikbaar stellen van zijn perceel voor het opstellen van de meetapparatuur. Het RIVM dankt de medewerkers van TenneT: Alex van Dijk, Paul Janssen, Kees Koreman en de medewerkers van het Asset Informatieloket.

Samenvatting

Het Nederlandse voorzorgsbeleid voor bovengrondse hoogspanningslijnen is gebaseerd op een berekende magneetveldzone. Deze specifieke magneetveldzone - waar het magneetveld gemiddeld over een jaar sterker is dan 0,4 microtesla - kan worden berekend met de Handreiking van het RIVM. Hierbij is voor berekeningen gekozen, omdat bij berekeningen uit kan worden gegaan van een vooraf bepaalde (vaste) stroomwaarde die ook representatief is voor de toekomst.

Sommige mensen die in de buurt van hoogspanningslijnen wonen, vragen zich af of berekende (gemodelleerde) magneetvelden overeenkomen met gemeten magneetvelden. Zij geven aan meer vertrouwen te hebben in metingen en pleiten voor magneetveldmetingen in de buurt van hoogspanningslijnen. Om hieraan tegemoet te komen heeft het ministerie van Infrastructuur en Milieu het RIVM gevraagd om een validatieonderzoek uit te voeren. In dit onderzoek worden metingen van het magneetveld in de buurt van een hoogspanningslijn uitgevoerd. Deze metingen worden vergeleken met de uitkomst van modelberekeningen.

Het validatieonderzoek is uitgevoerd bij een bestaande hoogspanningslijn in Maartensdijk. Het onderzoek bestond uit:

- magneetveldmetingen (24 uur) bij de hoogspanningslijn;
- berekening van magneetvelden met een rekenmodel, met de stroom door de lijn tijdens de metingen;
- vergelijking van gemeten en gemodelleerde magneetvelden.

Het voorliggende rapport beschrijft de meetprocedure, analyse en resultaten van het onderzoek.

De resultaten die in dit rapport zijn beschreven laten zien dat het rekenmodel goed te gebruiken is om te bepalen waar de 0,4 microteslazonengrens ligt.

Vanwege de verschillen tussen berekende en gemeten magneetvelden kan de zone waar de 0,4 microtesla (jaargemiddeld) wordt overschreden, verschillen van de volgens de Handreiking berekende specifieke magneetveldzone. Voor de situatie in Maartensdijk blijkt dat de mogelijke verschillen binnen de marge van ± 5 m liggen die in de uitvoeringspraktijk van het voorzorgsbeleid door het ministerie van Infrastructuur en Milieu wordt geaccepteerd.

Monitoren van de stroombelasting is voldoende om te waarborgen dat de daadwerkelijke 0,4 microteslazonen in Maartensdijk niet breder is dan de met de Handreiking berekende (niet-afgeronde) magneetveldzone, binnen de genoemde marge van ± 5 m.

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Tijdens opwekking, transport en gebruik van elektriciteit ontstaan magneetvelden met extreem lage frequentie. Internationaal wetenschappelijk onderzoek wijst op een mogelijk hoger risico op leukemie voor kinderen die in de buurt van bovengrondse hoogspanningslijnen wonen. Uit het onderzoek is een samenhang gebleken tussen wonen in de buurt van hoogspanningslijnen en de kans op het krijgen van leukemie door kinderen. Het is niet aangetoond dat het magneetveld van die hoogspanningslijnen de oorzaak is.

De Rijksoverheid heeft op grond van het voorzorgsprincipe beleid ontwikkeld. Dat beleid is eind 2005 vastgelegd in een brief aan gemeenten, provincies en netbeheerders [1] en in 2008 nader toegelicht [2]. Centraal in het beleid staat de magneetveldzone die is gedefinieerd als de strook grond die zich aan beide zijden langs de bovengrondse hoogspanningslijn uitstrekt en waarbinnen het magneetveld gemiddeld over een jaar hoger is dan 0,4 microtesla of in de toekomst kan worden. Het RIVM heeft een Handreiking ontwikkeld voor het berekenen van de breedte van deze (specifieke) magneetveldzone [3].

Binnen dit beleid is gekozen voor een toekomstbestendige magneetveldzone op basis van berekeningen met een vaste stroom, niet op basis van metingen. Omdat de stroom door hoogspanningslijnen varieert, varieert ook het magneetveld. Het berekenen van een zone heeft als voordeel ten opzichte van metingen dat kan worden uitgegaan van een vaste stroom door de lijn. Deze stroom, een vast percentage van de ontwerpstroom, is in de Handreiking zodanig gekozen dat hij in de regel hoger is dan de werkelijke gemiddelde stroom door de lijn, nu en in de toekomst. Metingen geven een beeld dat hoort bij de stroom op het moment van de meting. Dit beeld zegt niets over het jaargemiddelde magneetveld, noch over het magneetveld in de toekomst. Ook kunnen metingen niet worden gebruikt om zones te bepalen bij de aanleg van nieuwe hoogspanningslijnen.

Omwonenden van (nieuwe) hoogspanningslijnen vragen zich soms af of berekende magneetvelden overeenkomen met gemeten magneetvelden. Zij geven aan meer vertrouwen te hebben in metingen. Zij pleiten dan ook voor metingen bij hoogspanningslijnen om aan te tonen dat de jaargemiddelde sterkte van het magneetveld buiten de magneetveldzone ook werkelijk lager is dan 0,4 microtesla.

1.2 Validatieonderzoek

De steeds terugkerende vraag van omwonenden om metingen was voor het ministerie van Infrastructuur en Milieu (IenM) aanleiding het RIVM te vragen een validatieonderzoek uit te voeren. In dit onderzoek worden metingen van het magneetveld in de buurt van enkele hoogspanningslijnen uitgevoerd. Ook worden de magneetvelden berekend met behulp van een rekenmodel volgens de Handreiking, op basis van de situatie tijdens de magneetveldmetingen. De metingen en de modelberekeningen worden met elkaar vergeleken.

Dit validatieonderzoek is uitgevoerd bij een bestaande hoogspanningslijn in Maartensdijk. Het voorliggende rapport beschrijft de meetprocedure, analyse en resultaten van dit onderzoek.

1.3 Vraagstelling

De vraagstelling voor het validatieonderzoek in Maartensdijk is:

- Hoe kunnen gemeten en berekende magneetvelden worden vergeleken en hoe goed komen gemeten en berekende (gemodelleerde) magneetvelden in Maartensdijk met elkaar overeen?
- Is monitoren van de stroombelasting van de lijn voldoende om te waarborgen dat het jaargemiddelde magneetveld buiten de magneetveldzone niet hoger is dan 0,4 microtesla?

1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 worden de methoden beschreven voor

1. de analyse van de verschillen tussen gemeten en gemodelleerde magneetvelden;
2. de meetmethoden voor de positiebepaling van de magneetveldmeters ten opzichte van de hoogspanningslijn, voor de magneetveldmetingen en voor de stroommetingen;
3. de methode voor berekening van de gemodelleerde magneetvelden op basis van een computermodel.

Hoofdstuk 3 geeft een overzicht van de resultaten van de metingen en modelberekeningen. In hoofdstuk 4 worden de magneetveldmetingen en de gemodelleerde magneetvelden met elkaar vergeleken. Hoofdstuk 5 bevat een nadere discussie van de resultaten. In hoofdstuk 0 zijn de conclusies samengevat.

2 Methoden

2.1 Analysemethode

Eén van de doelen van dit onderzoek is het ontwikkelen van een analyse-methode om gemeten en berekende magneetvelden te kunnen vergelijken.

Het magneetveld is afhankelijk van de stroom door de hoogspanningslijn: hoe sterker de stroom, des te hoger het magneetveld. Omdat de stroom varieert, kunnen per (meet)locatie alleen de afzonderlijke op hetzelfde tijdstip gemeten en gemodelleerde magneetvelden direct met elkaar worden vergeleken. In het ideale geval is het verschil tussen gemeten en gemodelleerd magneetveld op elke meetlocatie en op elk tijdstip gelijk aan nul.

In de praktijk moet er echter rekening gehouden worden met de onzekerheid in de gemeten en gemodelleerde magneetvelden. Deze onzekerheid hangt enerzijds samen met de onnauwkeurigheid van de gebruikte meetapparatuur en rekenmodellen en de invloed van omgevingsfactoren (temperatuur, wind). De invloed van deze onnauwkeurigheden moet voor elke situatie worden geschat. De invloed kan echter alleen worden beperkt door te kiezen voor apparatuur of rekenmodellen met andere specificaties, of door metingen uit te voeren bij bepaalde weersomstandigheden.

Anderzijds hangt de onzekerheid samen met factoren die wel te beïnvloeden zijn, zoals afwijkingen in de exacte plaats van de meetlocaties en verschuivingen in tijdregistratie van de meters onderling (magneetveld en stroom).

Vervolgens wordt voor elke meetlocatie en voor elk meettijdstip het absolute verschil (in microtesla) tussen het gemodelleerde en het gemeten magneetveld bepaald. Ook wordt het relatieve verschil tussen gemodelleerd en gemeten magneetveld bepaald ten opzichte van het gemiddelde volgens:

$$(\text{relatieve verschil model en meting})_{x,t} = \frac{(\text{verschil model en meting})_{x,t}}{(\text{gemiddelde model en meting})_{x,t}}$$

Het gemiddelde van alle relatieve verschillen per meetlocatie geeft het gemiddelde relatieve verschil tussen gemodelleerde en gemeten magneetvelden op die locatie. Uit de analyse volgt tevens de standaard error. Het werkelijke gemiddelde relatieve verschil tussen gemodelleerde en gemeten magneetvelden ligt met 95% zekerheid tussen de grenzen die wordt aangegeven door het relatieve verschil ± 2 x standaard error.

De op deze manier in de praktijk bepaalde gemiddelde relatieve verschillen kunnen worden vergeleken met de theoretische onzekerheidsmarge, bepaald bij dezelfde omstandigheden. Deze theoretische marge is het relatieve verschil dat mogelijk is op basis van een theoretische conservatieve beschouwing van alle factoren die de resultaten kunnen beïnvloeden. Door het conservatieve karakter van de beschouwingen geldt de theoretische marge als 'worst case'. De theoretische marge wordt eveneens uitgedrukt als een 95%-betrouwbaarheidsinterval. Als de 95%-betrouwbaarheidsgrenzen van de in de praktijk bepaalde gemiddelde relatieve verschillen binnen de theoretische onzekerheidsmarge vallen, dan mag aangenomen worden dat metingen en modelberekeningen op betrouwbare wijze zijn uitgevoerd.

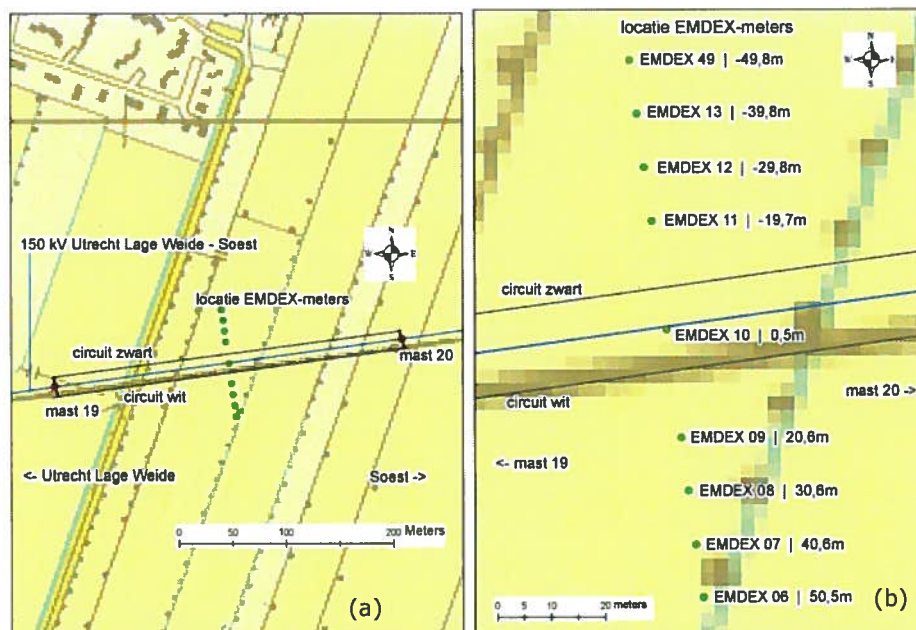
2.2 Meetmethoden

2.2.1 Meetlocatie, positiebepaling en meetperiode

Meetlocatie

De metingen zijn uitgevoerd in een weiland langs de Prinsenlaan in Maartensdijk (gemeente De Bilt). Over het perceel, kadastraal bekend als Maartensdijk N 1043-1044-915, loopt de 150 kV, 2 circuits hoogspanningslijn Utrecht Lage Weide – Soest (TAMS ULW-SOS150, circuits zwart en wit). De twee circuits hebben dezelfde eigenschappen. Hoogspanningslijnen in Nederland bestaan in de meeste gevallen uit twee circuits, zodat bij het uitvallen van één van de circuits het overgebleven circuit alle stroom kan blijven voeren. Dat is ook de reden dat de stroom door elk circuit normaal gesproken gemiddeld lager is dan 50% van de ontwerpstroom.

Bij het vestigen van het zakelijk recht op het perceel is overeengekomen dat TenneT voor werkzaamheden gebruik mag maken van het perceel. De eigenaar heeft zijn perceel beschikbaar gesteld voor het opstellen van de meetapparatuur (zie Figuur 1).



Figuur 1 Weergave van de meetlocatie halverwege tussen mast 19 en 20, in een lijn loodrecht op de hoogspanningslijn: (a) geeft het overzicht en (b) de locaties van de meetpalen waaraan de magneetveldmeters zijn bevestigd

Het circuit zwart bevindt zich aan de noordzijde van de hartlijn, dus kijkend van mast 19 naar mast 20 aan de linkerkant. Het circuit wit bevindt zich aan de zuidzijde van de hartlijn, dus kijkend van mast 19 naar mast 20 aan de rechterkant. Masten 19 en 20 zijn even hoog.

De metingen vonden plaats ter hoogte van het punt waar de geleiders het laagst hangen, midden tussen de masten 19 en 20. De metingen werden vanaf dit punt uitgevoerd langs een lijn die loodrecht staat op de hartlijn tussen de twee masten, op verschillende afstanden vanaf de hartlijn. De meters werden op 1 m hoogte bevestigd aan een houten paal. Eén paal werd ter hoogte van het punt waar de geleiders het laagst hangen zo goed mogelijk midden op de hartlijn van

de hoogspanningslijn geplaatst (referentiepunt: 0 m). De andere palen werden aan weerszijden van de lijn geplaatst op de beoogde afstanden van 20 m, 30 m, 40 m en 50 m vanaf de hartlijn. Figuur 2 en Figuur 3 geven een impressie van de locatie en de meetopstelling.



Figuur 2 Hoogspanningslijn Utrecht Lage Weide – Soest (locatie tussen mast 19 en mast 20, kijkend langs mast 20 in de richting van Soest)



Figuur 3 Plaatsing van meetpalen aan één zijde van de hartlijn

Positiebepaling meetpalen

Voorafgaand aan de plaatsing van de meetpalen zijn de Rijksdriehoekskoördinaten van de beoogde meetpunten bepaald, op basis van de door TenneT

verstrekke coördinaten van de masten. Bij de plaatsing van de meetpalen is getracht deze exacte coördinaten te bepalen met behulp van een GPS positielogger (Garmin Etrex 30), maar dit bleek in het weiland in Maartensdijk enkele meters afwijking op te leveren. De GPS-data zijn vanwege deze reden niet in de analyse gebruikt en niet in dit rapport vermeld.

De centrale meetpaal is vervolgens zo goed mogelijk op het hart van de lijn geplaatst op basis van visuele beoordeling: op het hart van de lijn liggen de eerstvolgende masten in beide richtingen exact in elkaars verlengde.

Na plaatsing van de meetpalen met de magneetveldmeters is met behulp van een laserafstandmeter (Bosch PLR 25, S/N 205516559) de locatie van de centrale meetpaal ten opzichte van de beide masten en de geleiders aan weerszijden van de hartlijn gecontroleerd. Uit deze metingen werd afgeleid dat de centrale meetpaal in werkelijkheid 50 centimeter ten zuiden van de hartlijn stond. Vervolgens werden met de laserafstandmeter eveneens de onderlinge afstanden tussen de palen gemeten, met als referentiepunt de centrale meetpaal. De op deze wijze gecorrigeerde posities van de centrale meetpaal en de onderlinge afstanden tussen de meetpalen zijn in de analyses verwerkt.

In Tabel 1 zijn de beoogde posities en de uiteindelijke werkelijke posities van alle meetpalen weergegeven.

Tabel 1 De van tevoren beoogde posities van de magneetveldmeters en de uiteindelijk in het veld gerealiseerde posities. (Z = ten zuiden van de hartlijn, positieve afstanden. N = ten noorden van de hartlijn, negatieve afstanden)

meter nr.	beoogde positie (m)		werkelijke positie (m)	
06	50	Z	50,5	Z
07	40	Z	40,6	Z
08	30	Z	30,6	Z
09	20	Z	20,6	Z
10	0	op de hartlijn	0,5	Z
11	-20	N	-19,7	N
12	-30	N	-29,8	N
13	-40	N	-39,8	N
49	-50	N	-49,8	N

De afstand tussen het maaiveld en de laagst hangende geleiders is bij een geleidertemperatuur van 15°C volgens de door TenneT aangeleverde ontwerpgegevens 10,63 m (zie Bijlage 2). Deze afstand is op de avond van de eerste meetdag eveneens gemeten met behulp van de laserafstandmeter. De gemeten afstand bedroeg op 17 september 2012 om 20:10 uur 12,55 m. Op dit tijdstip was de gemiddelde stroom door de geleiders 35 A. De verwachting is dat de geleidertemperatuur onder deze omstandigheden hooguit enkele graden zal afwijken van de uitgangstemperatuur van 15°C die voor de berekeningen wordt gehanteerd.

Het verschil van ongeveer 2 m tussen de gemeten afstand en de ontwerpafstand kan verschillende oorzaken hebben, zoals:

- Bouw/bedrijfsvoering van de lijn: verschillen tussen ontwerp en realisatie, waardoor de door TenneT aangeleverde waarde onjuist is.
- Afstandsmetingen: meetpositie niet exact op het laagste punt van de geleider en/of niet loodrecht onder dit punt.

- Maaiveld: veranderingen in maaiveldhoogte sinds de aanleg van de lijn en/of lokale verschillen in maaiveldhoogte.

Meetperiode

De magneetvelden werden gemeten gedurende 24 uur, tussen 17 september 2012 17:00 uur en 18 september 2012 17.00 uur.

De gemiddelde etmaal-temperatuur in De Bilt op 17 september 2012 was 11,7°C (minimum 7,0°C, maximum 15,7°C).

De gemiddelde etmaal-temperatuur in De Bilt op 18 september 2012 was 15,2°C (minimum 13,0°C, maximum 18,6°C) [4].

2.2.2

Magneetveldmetingen

Voor de magneetveldmetingen zijn EMDEX Lite meters gebruikt (fabrikant en leverancier Enertech Consultants, California, USA) zie Figuur 4. Voor specificaties zie <http://www.enertech.net/html/EMDEXLiteSpecs.html>). Voor het uitlezen van de meters en het opslaan van de meetgegevens op de PC is het softwarepakket EMCALC2013 (leverancier Enertech Consultants, California, USA) gebruikt.



Figuur 4 De EMDEX Lite magneetveldmeter

Deze meters meten de effectieve (RMS) breedbandwaarde van het magneetveld in het frequentiegebied van 40 tot 1000 Hz. De metingen worden in het apparaat opgeslagen, waarbij de tijd gemeten wordt vanaf het moment van aanzetten van de meter. Na afloop van de gehele meetserie worden de waarden uitgelezen. Het tijdstip van de uitlezing bepaalt hierbij het tijdstip waarop de meting werd beëindigd: alle meetmomenten worden teruggerekend vanaf dit vaste tijdstip. Tijdens de meetperiode waren de meters zo ingesteld dat er elke vier seconden werd gemeten.

De meter geeft het magneetveld automatisch weer in stappen van 0,01 microtesla. Dit betekent dat de detectiegrens, de laagste waarde van het magneetveld die de meters kunnen detecteren, 0,005 microtesla is.

De meetnauwkeurigheid van deze magneetveldmeters is volgens de specificaties ± 2 tot 4% bij 27°C. Vanwege de relatief lage veldsterkten ten opzichte van het meetbereik en de breedbandige meetmethode (niet frequentiespecifiek bij 50 Hz) is bij deze validatie uitgegaan van 4% meetnauwkeurigheid bij 27°C. Daarnaast is in de specificaties aangegeven dat

de meetnauwkeurigheid 3% toeneemt per 10°C afwijking (van 27°C). Bij de magneetveldmetingen in Maartensdijk is daarom uitgegaan van 7% meetnauwkeurigheid.

Om de meters te beschermen en droog te houden werd een terrastegel boven op de plaat bevestigd en zijn de meters ingesloten in een plastic doos en ingepakt in een plastic zak (zie Figuur 5). De materialen van de paal, de terrastegel, de plastic doos en de plastic zak beïnvloeden het magneetveld niet.



Figuur 5 De magneetveldmeter in plastic doos op 1 m hoogte

2.2.3 Stroommetingen

De stroom door de geleiders kan niet op de locatie zelf worden gemeten. TenneT heeft echter meters in hoogspanningsstations geïnstalleerd die doorgaans elke vier seconden de stroom en de spanning meten. De meetgegevens worden verwerkt en in een database opgeslagen, in de vorm van vijfminutenwaarden voor de spanning U , het werkelijke of actieve vermogen P (in MW) en het blind- of reactieve vermogen Q (in MVar). Deze meet- en verwerkingsprocedure is beschreven in Bijlage 3.

TenneT heeft voor elke vijf minuten in de meetperiode voor station Soest en station Utrecht Lage Weide de volgende gegevens geleverd: datum, tijd, P voor circuit wit, Q voor circuit wit, P voor circuit zwart, Q voor circuit zwart en de railspanning U . Voor het berekenen van de magneetvelden is de stroom door het witte en het zwarte circuit van belang. Deze stroom (I in ampère) wordt uit U (in volt), P (in watt) en Q (in volt ampère reactief) berekend volgens:

$$I = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{U\sqrt{3}}$$

De gemeten waarden voor Q in de beide stations aan het begin en het eind van de lijn zijn niet gelijk. De verklaring hiervoor is dat de lijn zelf ook blindvermogen (laadstroom) levert dat tot deze verschillen leidt. De gemeten waarden voor P zijn wel vergelijkbaar. Vooral bij lage belasting van de lijn kan de zogenoemde laadstroom een rol van betekenis spelen. Een deel van de verbinding Utrecht Lage Weide - Soest bestaat uit ondergrondse kabels; dit gedeelte bevindt zich tussen Utrecht Lage Weide en de meetlocatie in Maartensdijk. Een kabel heeft een hogere capaciteit dan een bovengrondse lijn en zorgt voor meer laadstroom dan een lijn. De stroom op de meetlocatie zal vanwege dit 'laadstroom-effect' van de kabels richting Utrecht Lage Weide meer overeenkomen met de stroom gemeten in Soest dan met de stroom gemeten in Utrecht Lage Weide. Daarom is ervoor gekozen om de stroom die bepaald is uit de meetgegevens in station Soest als uitgangspunt te nemen voor de stroom op de meetlocatie.

In de Handreiking wordt aangenomen dat de stromen gelijkmatig over beide circuits verdeeld zijn. Dat blijkt in de praktijk in Maartensdijk te kloppen. Het verschil in de stromen door circuit wit en zwart zijn tijdens de metingen gemiddeld kleiner dan 3%. Bij de in de analyse gebruikte periode (zes uur met stroomsterkte groter dan 80 A) was het verschil kleiner dan 1%. Bij het berekenen van de magneetvelden wordt daarom uitgegaan van per circuit de tussen wit en zwart gemiddelde stroom.

Bijlage 3 bevat tevens een uitgebreide analyse van de onnauwkeurigheid in de resultaten van de stroommetingen.

De gemeten en gemodelleerde magneetvelden zijn in de uiteindelijke analyse vergeleken gedurende een periode van zes uur (zie paragraaf 4.1). In deze zes uur was de gemiddelde stroom $113,6 \pm 29,4$ A ($\pm 26,0\%$; 95%-betrouwbaarheidsinterval).

2.3 Modelberekeningen

2.3.1 Inleiding

Magneetvelden zijn berekend met een rekenmodel dat gebruikmaakt van EFC400 (versie 2008, build 2082), een commercieel verkrijgbaar softwarepakket (Forschungsgesellschaft für Energie und Umwelttechnologie, Berlijn; FGEU). Met dit model kan de sterkte van elektrische en magnetische velden rond hoogspanningslijnen worden berekend. Dit rekenmodel wordt ook toegepast om specifieke magneetveldzones te berekenen conform de Handreiking.

2.3.2 Handreikingsprofiel

Het rekenmodel is gebruikt om een dwarsprofiel te berekenen van het magneetveld, midden tussen de masten en loodrecht op de hartlijn, als functie van de afstand tot de hartlijn. Negatieve afstanden liggen ten noorden van de hartlijn, aan de zijde van circuit zwart (Figuur 1).

Allereerst is een magneetveldprofiel berekend volgens de Handreiking. Bij de berekening is uitgegaan van de door het Asset Informatieloket van TenneT verstrekte gegevens in Bijlage 2. Conform de Handreiking wordt de berekening uitgevoerd bij een rekenstroom van 483 A (50% van de ontwerpstroom, 966 A). Dit magneetveldprofiel wordt aangeduid als 'Handreikingsprofiel'.

Op basis van bovenstaande gegevens is de 0,4 microteslazone berekend. Dit is de magneetveldzone van de lijn, zonder de afronding op eenheden van 5 m die

normaal gesproken wordt toegepast om de specifieke magneetveldzone te bepalen.

2.3.3 *Gemodelleerd magneetveld bij actuele stroom*

Tijdens de uitgevoerde metingen in Maartensdijk was zoals verwacht de actuele stroom door de lijn lager dan 50% van de ontwerpstroom. De gemeten magneetvelden kunnen dan ook niet rechtstreeks vergeleken worden met de gemodelleerde magneetvelden uit het Handreikingsprofiel. Ze kunnen wel worden vergeleken met gemodelleerde magneetvelden op basis van de actuele stroom.

Om een vergelijking tussen gemeten en gemodelleerde magneetvelden mogelijk te maken is voor elke meetlocatie (positie van de magneetveldmeters) de relatie tussen het berekende magneetveld en de actuele stroom bepaald. Zo kan voor elke meetlocatie bij elke actuele stroomwaarde die afgeleid is uit de gegevens van TenneT het magneetveld worden berekend.

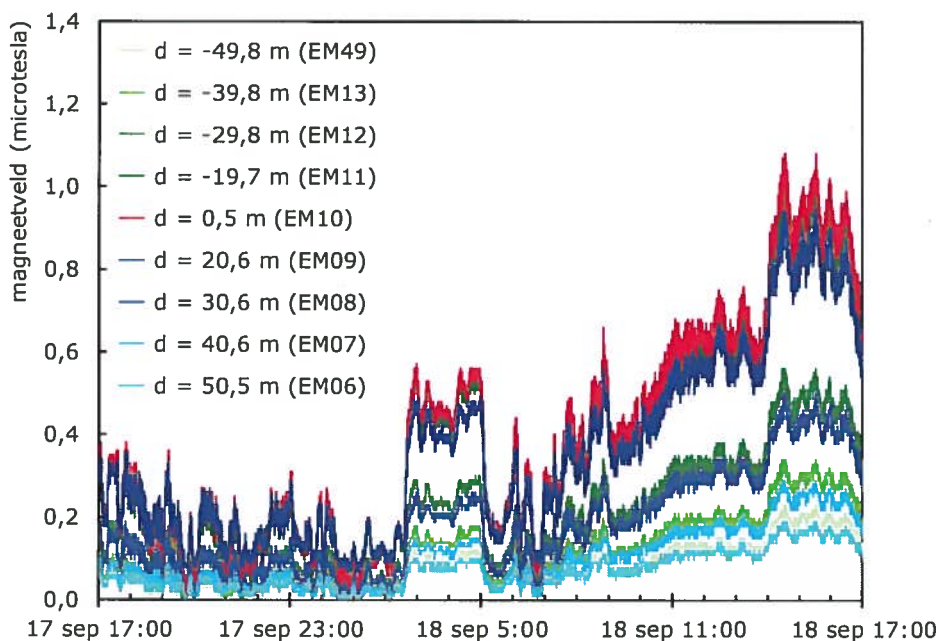
Omdat de actuele stroom invloed heeft op het gemodelleerde magneetveld, draagt de onnauwkeurigheid in de stroommetingen bij aan de onnauwkeurigheid in de gemodelleerde magneetvelden. Daarnaast draagt ook de onnauwkeurigheid in de schatting van andere invoerparameters (afmetingen, mastposities, doorhang etc.) bij aan de onnauwkeurigheid, evenals de aannames en vereenvoudigingen in het rekenmodel zelf. Voor een volledige analyse hiervan wordt verwezen naar Bijlagen 3 en 4.

3 Resultaten metingen en modelberekeningen

3.1 Beschrijving van de meetresultaten

3.1.1 Magneetveldmetingen

In Figuur 6 is een overzicht weergegeven van de resultaten van de magneetveldmetingen van de magneetveldmeters die op 1 m hoogte zijn geplaatst, gedurende de hele meetperiode van 24 uur. Uit deze figuur blijkt dat het gemeten magneetveld varieert tijdens deze periode.



Figuur 6 Weergave van gemeten magneetvelden op 1 m boven maaiveld gedurende de gehele meetdag (d is de oorspronkelijk beoogde afstand van de meetlocatie tot de hartlijn; tussen haakjes staan de meternummers: EM06 is meter nummer 06)

Uit Figuur 6 blijkt dat de magneetveldcurven in de tijd hetzelfde patroon volgen. Ook de invloed van de afstand tot de geleiders is zichtbaar: het magneetveld is relatief hoog op 0 m en op 20 m afstand vanaf de hartlijn en neemt voorbij de 20 m afstand verder af bij toenemende afstand vanaf de hartlijn.

Bij een controle na de metingen bleek dat meter nummer 09 bij afwezigheid van een magneetveld toch een veldsterkte boven 0 aangaf. Hieruit werd geconcludeerd dat de resultaten van deze meter onbetrouwbaar waren. De resultaten van deze meter zijn daarom niet verder geanalyseerd.

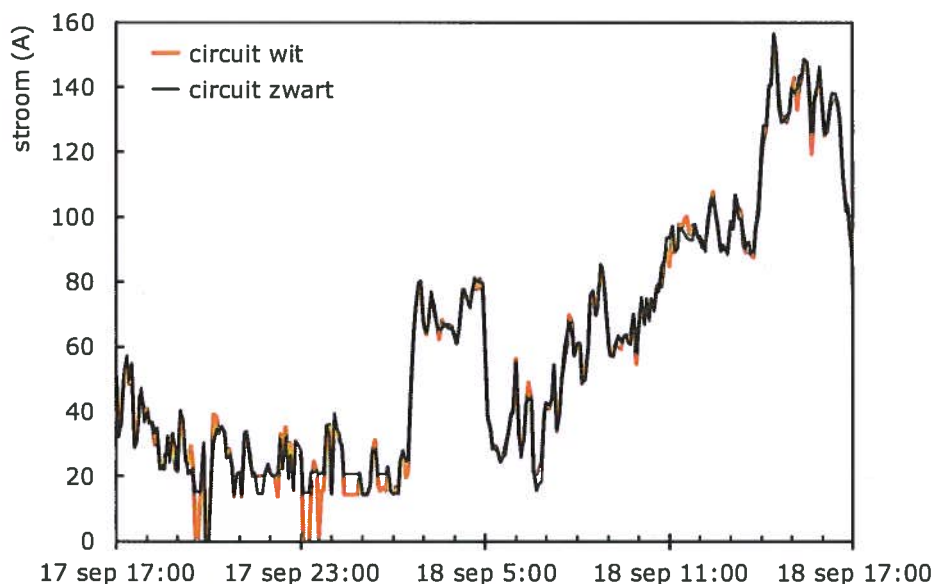
De metingen die op dezelfde afstand aan weerszijden van de hartlijn zijn uitgevoerd (i.e. op de beoogde locaties 30, 40 of 50 m) geven niet dezelfde gemeten magneetvelden aan, omdat de daadwerkelijke meetlocaties afwijken van de beoogde meetlocaties.

De magneetveldmeters hebben geen absolute tijdregistratie. Hierdoor kunnen de tijdregistraties van de meters verschillen. Om de meters onderling te

synchroniseren is gebruikgemaakt van de magneetveldtijdcurves uit Figuur 6. Het verloop van elke curve is afhankelijk van de stroom door de lijn. Wanneer de stroom door de lijn verandert, verandert het magneetveld op hetzelfde moment ook. Dat betekent dat het tijdverloop van alle curves over elkaar heen gelegd kan worden wanneer de tijdregistratie identiek is. De curves van de verschillende magneetveldmeters zijn in stappen van steeds vier seconden verschoven totdat het verloop samenviel met de curve van meter nummer 10, de meter die op de hartlijn was geplaatst. Het maximale tijdsverschil tussen de meters onderling was 36 seconden.

3.1.2 *Stroommetingen*

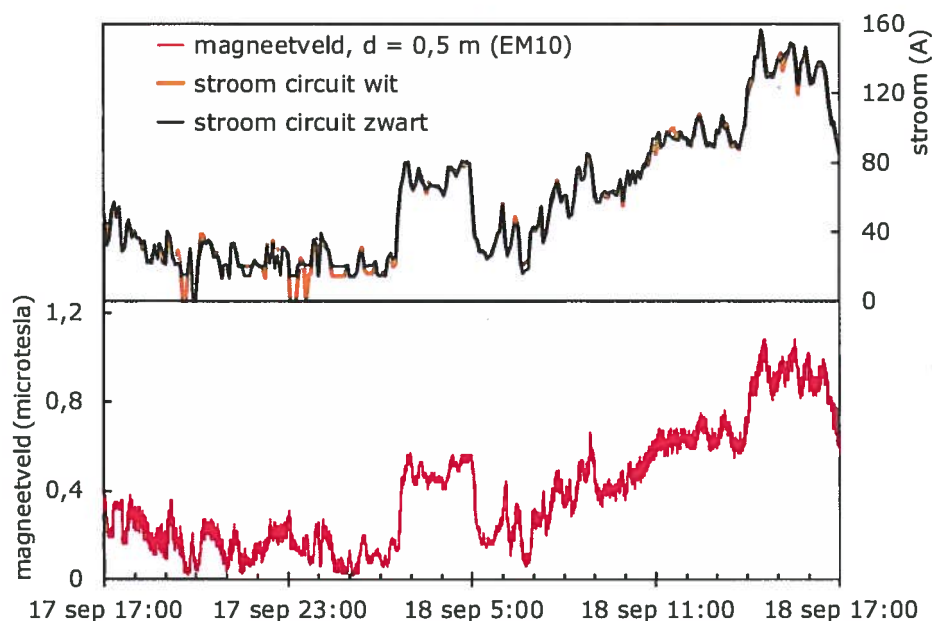
De stromen door de circuits wit en zwart zijn berekend op basis van de meetgegevens in station Soest. Deze zijn weergegeven in Figuur 7.



Figuur 7 Stroom door circuit wit en circuit zwart voor elke vijf minuten gedurende de meetperiode, berekend op basis van metingen door TenneT in station Soest

In Figuur 8 zijn de stromen in één grafiek vergeleken met de magneetvelden die gemeten zijn ter hoogte van het hart van de lijn (meter 10, beoogde afstand tot hartlijn $d=0$ m).

Het verloop van de gemeten magneetveldcurve in Figuur 8 volgt het verloop van de beide stroomcurves in station Soest. Meting van de stroom in station Soest kan dus worden beschouwd als een benadering van de daadwerkelijke stroom door de circuits ter hoogte van de meetlocaties tussen mast 19 en mast 20.



Figuur 8 Gemeten stroom per vijf minuten voor circuit wit en zwart in Soest en gemeten magneetveld per vier seconden (meter 10)

Bij het vergelijken van de opgegeven stroom en de gemeten magneetvelden bleek dat er sprake was van een verschil in de tijdregistratie tussen de stroommetingen en de magneetveldmetingen. Wanneer de stroom door de lijn verandert, verandert het magneetveld op hetzelfde moment ook. Dat betekent dat het verloop van de stroomcurves en de magneetveldcurve over elkaar heen gelegd kan worden wanneer de tijdregistratie identiek is. De stroomcurves en de gemeten magneetveldcurve van de magneetveldmeter op de hartlijn werden daarom ten opzichte van elkaar verschoven, totdat het tijdverloop van beide curves samenviel. Hierbij bleek een verschuiving van 4 minuten en 32 seconden noodzakelijk te zijn. De andere magneetveldmeters waren al gesynchroniseerd ten opzichte van meter 10 (zie paragraaf 3.1.1). Door beide controles te combineren werden de stroommeter en alle magneetveldmeters gesynchroniseerd.

De gemiddelde stroom gedurende de meetdag bedroeg 58 A. De maximaal gemeten stroom tijdens de meetdag bedroeg 148 A. Tijdens de meetdag werd de hoogspanningsverbinding gemiddeld voor 6% en maximaal voor circa 15% belast.

TenneT heeft tevens gegevens over de stroom door deze verbinding gedurende het gehele kalenderjaar 2012 aangeleverd. In 2012 was de jaargemiddelde stroom 94 A. Dit houdt in dat in 2012 deze hoogspanningsverbinding gemiddeld tot minder dan 10% van de ontwerpwaarde werd belast. De daggemiddelde stroom op 17/18 september 2012 was lager dan de jaargemiddelde stroom in 2012.

Gegevens van de stroom tijdens de meetdag en tijdens het gehele jaar 2012 zijn samengevat in Tabel 2. Hierin is tevens aangegeven wat het percentage is van de daadwerkelijke stroom ten opzichte van de ontwerpstroom van de lijn (966 A).

Tabel 2 Belasting van de lijn tijdens de meetdag (17/18 september 2012) en gedurende het kalenderjaar 2012

periode	parameter	stroom (A)	percentage van ontwerpstroom (%)
meetdag	gemiddelde stroom	58	6,0
	maximale stroom	148	15,3
	95 percentiel	128	13,3
jaar 2012	gemiddelde stroom	94	9,7
	maximale stroom	489	50,6
	95 percentiel	202	20,9
Handreiking ^{*)}	rekenstroom	483	50,0

*) ter vergelijking, stroom die is gebruikt om de specifieke magneetveldzone van deze lijn te berekenen, conform de Handreiking

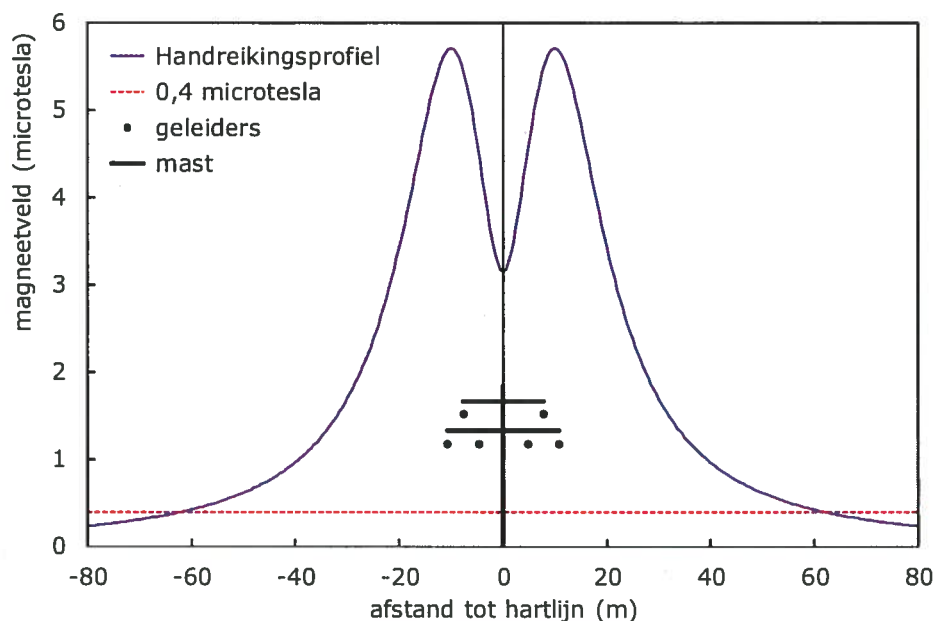
De maximale stroom die in 2012 is getransporteerd door deze verbinding bedroeg 489 A, op 22 augustus, een kortstondige piek gedurende vijf minuten. Deze maximale (piek)stroom is vrijwel gelijk aan de rekenstroom van 483 A, die voor de modelberekeningen is gehanteerd om het Handreikingsprofiel van deze lijn te bepalen (zie paragraaf 3.2). In 2012 was gedurende 95% van de tijd de stroom lager dan 202 A, dus lager dan 21% van de ontwerpbelasting.

3.2 Beschrijving van de resultaten van modelberekeningen

3.2.1 Berekend Handreikingsprofiel

In Figuur 9 is het berekende Handreikingsprofiel weergegeven, gebaseerd op een stroom van 50% van de ontwerpbelasting van de lijn.

De specifieke magneetveldzone bedraagt voor het vaksegment tussen mast 19 en mast 20 in Maartensdijk 60 m aan weerszijden van de lijn. Zonder afronding is de 0,4 microteslazone 61,9 m aan weerszijden van de lijn. In deze figuur is tevens een schematische weergave van de mast met de doorsnede van de zes geleiders opgenomen om de positie van de geleiders ten opzichte van de hartlijn aan te geven.



Figuur 9 Handreikingsprofiel: het magneetveldprofiel geeft de sterkte van het gemodelleerde magneetveld als functie van de afstand tot de hartlijn weer, bij een rekenstroom van 50% van de ontwerpstroom (483 A)

3.2.2 Berekende magneetveldprofielen tijdens meetdag en tijdens het jaar 2012

Om het magneetveld op een bepaalde meetlocatie en een bepaald tijdstip te kunnen berekenen zijn de actuele stroom op dat tijdstip en de daadwerkelijke afstand van de meetlocatie tot de hartlijn tussen twee masten van belang. Op elke meetlocatie is het verband tussen het gemodelleerde magneetveld (met EFC400) en de stroom lineair:

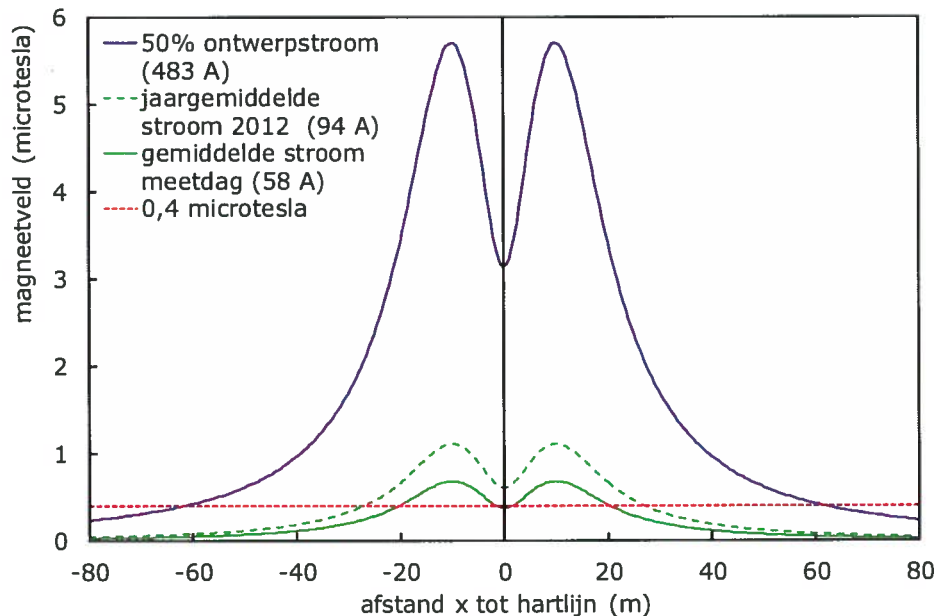
$$\text{Gemodelleerd magneetveld} = \text{evenredigheidsconstante} \times \text{stroom}$$

In Tabel 3 zijn voor alle meetlocaties de evenredigheidsconstanten weergegeven. Met behulp van deze constanten en de actuele stroom kan op elke meetlocatie en op elk tijdstip tijdens de magneetveldmetingen het gemodelleerde magneetveld worden berekend.

Tabel 3 Evenredigheidsconstanten tussen gemodelleerd magneetveld en actuele stroom voor elke meetlocatie in Maartensdijk

meter nummer	afstand tot hartlijn (m)	evenredigheidsconstante (microtesla/A)
10	0,5	0,006563
11	19,7	0,007239
12	29,8	0,003549
08	30,6	0,003374
13	39,8	0,002018
07	40,6	0,001939
49	49,8	0,001286
06	50,5	0,001251

Uitgaande van de meetdaggemiddelde stroom (58 A) en 2012-jaargemiddelde stroom (94 A) zijn twee actuele magneetveldcurves berekend. In Figuur 10 zijn de curves van het Handreikingsprofiel (483 A), het meetdag-gemiddelde profiel (58 A) en het 2012-jaargemiddelde profiel (94 A) met elkaar vergeleken. Deze laatste twee curves geven aan dat de actuele 0,4 microteslazone tijdens de meetdag en de actuele 0,4 microteslazone tijdens het jaar 2012 smaller waren dan de 0,4 microteslazone zoals berekend volgens de Handreiking.



Figuur 10 Gemodelleerde magneetveldprofielen, dat wil zeggen de sterkte van het magneetveld als functie van de afstand x tot de hartlijn: bij 50% van de ontwerpstroom (Handreikingsprofiel), gemiddeld tijdens de metingen en gemiddeld gedurende het jaar 2012

3.2.3 Invloed van aannames en vereenvoudigingen in het rekenmodel

Bij de toepassing van het rekenmodel conform de Handreiking is gebruik gemaakt van een aantal aannames en vereenvoudigingen. Voor het in dit rapport beschouwde vaksegment in Maartensdijk is de invloed van enkele van deze aannames op de uiteindelijk berekende zonebreedte onderzocht. Voor een beschouwing hiervan wordt verwezen naar Bijlage 6.

Hieruit blijkt dat het weglaten van de bliksemraden in deze situatie geen invloed heeft op de berekende veldsterkten. Bij het meenemen van de bliksemraden in de berekening heeft de grootte van de mastweerstand geen invloed op het resultaat. Berekening van de velden voor één vaksegment levert hetzelfde resultaat op als de berekening voor drie vaksegmenten. Uitzwaaiing van de geleiders door wind zal geen effect hebben op de berekende jaargemiddelde magneetvelden, maar kan bij harde wind wel een effect hebben op gemeten magneetvelden. (NB. Tijdens de metingen die in dit rapport zijn beschreven was er weinig wind.)

4 Vergelijking gemeten en gemodelleerde magneetvelden

4.1 Analyseperiode

Alleen bij een stroom boven 80 A zijn gegevens bekend over de onnauwkeurigheid van de stroomtransformator in station Soest (zie Bijlage 3). Een deel van de meetdag was de stroom door de hoogspanningslijn bij Maartensdijk echter lager dan 80 A. Daarom is ervoor gekozen om de analyse te beperken tot een aaneengesloten periode van zes uur gedurende de meetdag waarbinnen de stroom hoger is dan 80 A: op 18 september 2012 tussen 11:00 uur en 17:00 uur.

4.2 Globale vergelijking gemiddelde magneetvelden en spreiding

Om de gemeten en gemodelleerde magneetvelden in deze analyseperiode globaal te kunnen vergelijken, worden ze in één grafiek (Figuur 11) weergegeven. Hierbij zijn voor de overzichtelijkheid de meetlocaties aan beide kanten van de hartlijn geprojecteerd naar één kant van de hartlijn.

Voor elke meetlocatie is het gemiddelde gemeten magneetveld in de analyseperiode bepaald. Omdat binnen de analyseperiode de stroom varieerde, varieerde ook het gemeten magneetveld. Om deze variatie weer te kunnen geven is voor elke meetlocatie ook de spreiding in de gemeten waarden bepaald. Hierbij zijn de 2,5-percentiel-ondergrens en de 97,5-percentiel-bovengrens van de gemeten magneetvelden berekend. Dit betekent dat 95% van de gemeten magneetvelden binnen de aangegeven spreidingsgrenzen valt.

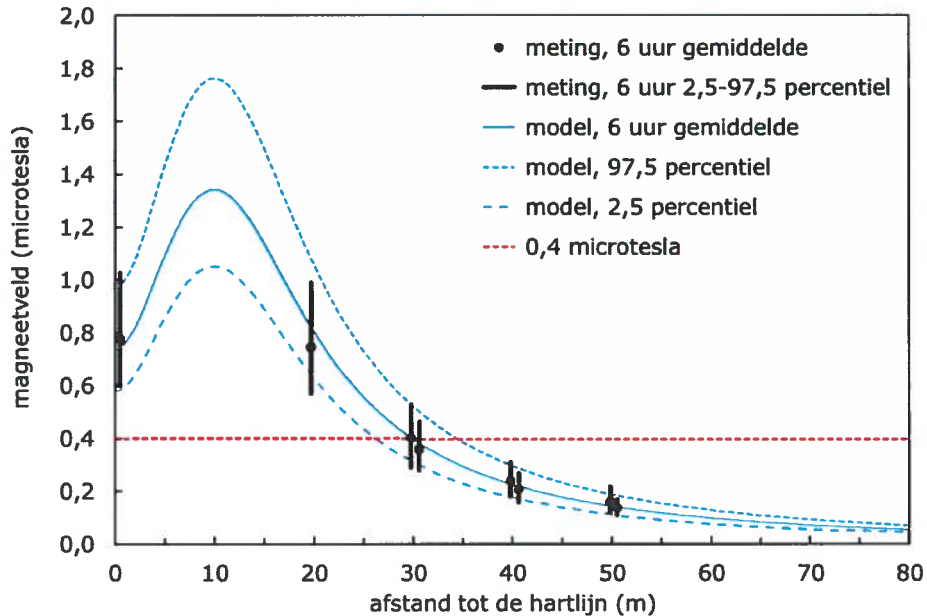
De berekening van de gemodelleerde magneetvelden hoeft niet beperkt te blijven tot de meetlocaties. Daarom zijn de gemodelleerde magneetvelden berekend in stapjes van 0,5 meter vanaf de hartlijn, zodat de resultaten als magneetveldprofielen in de grafiek kunnen worden weergegeven. Om het magneetveld te kunnen berekenen, is de actuele stroom nodig. Het gemiddelde gemodelleerde magneetveldprofiel is berekend op basis van de gemiddelde stroom in de analyseperiode. Net als bij de gemeten magneetvelden kan de invloed van de variatie in de stroom zichtbaar worden gemaakt door de spreiding in gemodelleerde magneetvelden weer te geven. Hiervoor zijn het 2,5-percentiel-profiel en de 97,5-percentiel-profiel van de gemodelleerde magneetvelden berekend, op basis van de 2,5-percentielwaarde en de 97,5-percentielwaarde van de stroom tijdens de analyseperiode. Dit betekent dat 95% van de gemodelleerde magneetveldprofielen binnen de aangegeven spreidingsgrenzen valt.

De gemiddelde stroom in de analyseperiode tussen 11:00 uur en 17:00 uur op 18 september 2012 bedroeg 113,6 A. De met het model berekende 0,4 microteslazone bij deze gemiddelde stroom is 29,9 m.

In Figuur 11 zijn voor de analyseperiode de gemiddelde gemeten magneetvelden (zwarte bolletjes) weergegeven op de verschillende meetlocaties, als functie van de afstand tot de hartlijn. De 2,5-percentiel-ondergrens is de onderkant van de zwarte balk op elke meetlocatie. De 97,5-percentiel-bovengrens is de bovenkant van de zwarte balk.

In Figuur 11 is ook het gemiddelde gemodelleerde magneetveldprofiel (doorgetrokken blauwe lijn) in de analyseperiode weergegeven. Het

2,5-percentiel-profiel en het 97,5-percentiel-profiel van de gemodelleerde magneetvelden in de analyseperiode zijn weergegeven rondom het gemiddelde profiel (blauwe stippellijnen).



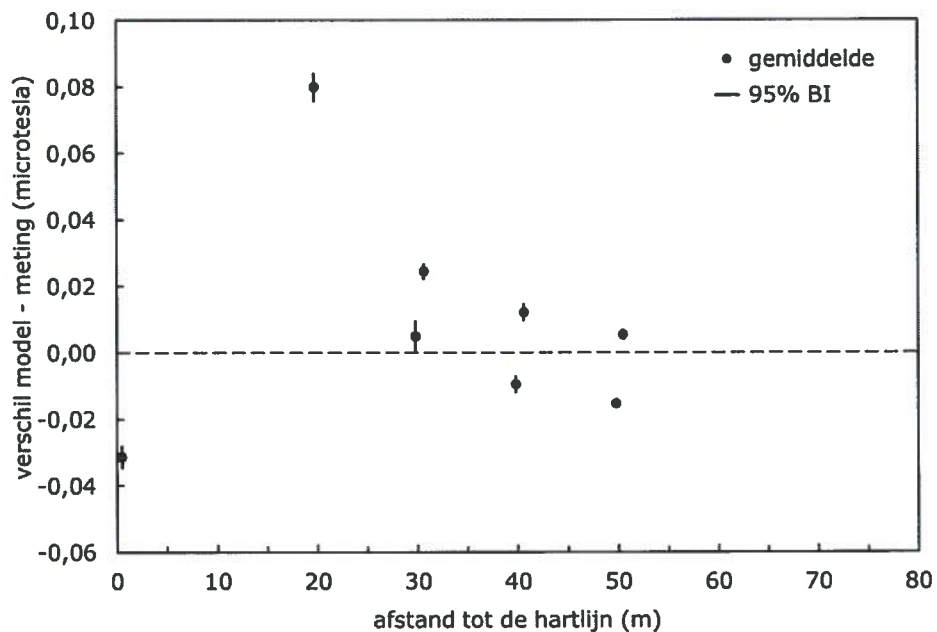
Figuur 11 Globale vergelijking tussen gemeten en gemodelleerde gemiddelde magneetvelden op 18 september 2012 tussen 11:00 uur en 17:00 uur, met spreiding in deze periode: 2,5 percentiel- en 97,5 percentiel-profielen/balken.

Uit Figuur 11 blijkt dat de ordegrrootte van de spreiding in gemeten en gemodelleerde magneetvelden overeenstemt.

4.3 Vergelijking metingen en modelberekeningen

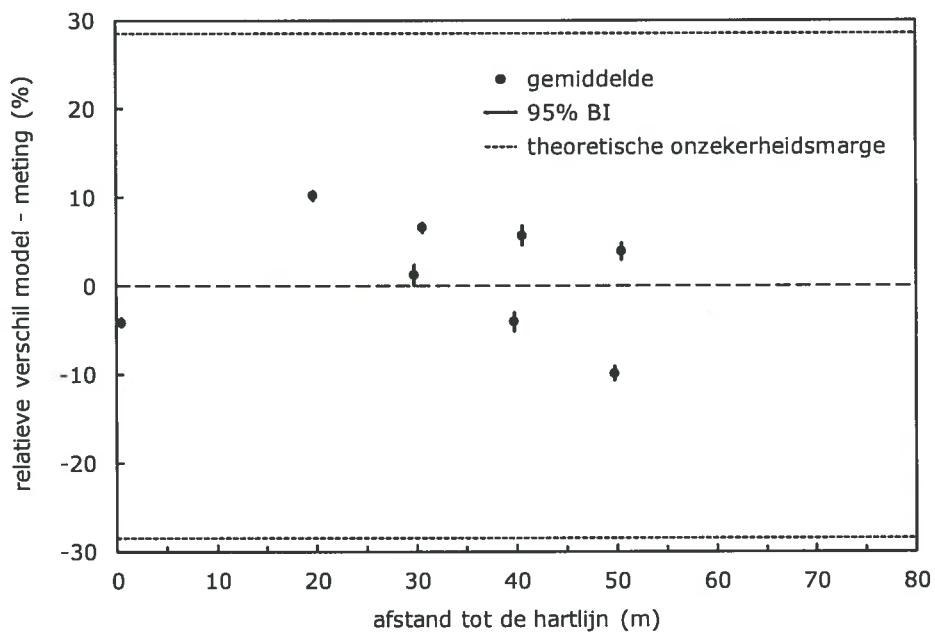
In de analyse wordt voor elk meettijdstip op elke meetlocatie het absolute verschil (in microtesla) tussen het gemodelleerde en het gemeten magneetveld bepaald. Ook wordt het relatieve verschil (in procenten) tussen het gemodelleerde en gemeten magneetveld bepaald. Deze absolute en relatieve verschillen voor elk van de 73 meettijdstippen worden vervolgens voor elke meetlocatie gemiddeld.

In Figuur 12 zijn de gemiddelde absolute verschillen tussen de gemodelleerde en gemeten magneetvelden voor elke meetlocatie weergegeven. Tevens zijn hierin de 95%-betrouwbaarheidsintervallen aangegeven (2 x standaard error). De data staan in tabelvorm in Bijlage 5 (zie Tabel 16). Hierbij dient te worden opgemerkt dat de magneetveldmeter maximaal stappen van 0,01 microtesla kan meten.



Figuur 12 Gemiddelde absolute verschil tussen de gemodelleerde en gemeten magneetvelden voor elke meetlocatie

In Figuur 13 zijn de gemiddelde relatieve verschillen tussen gemodelleerde en gemeten magneetvelden voor elke meetlocatie weergegeven. Tevens zijn hierin de 95%-betrouwbaarheidsintervallen aangegeven (2 x standaard error). De data staan in Tabel 16 in Bijlage 5.



Figuur 13 Gemiddelde relatieve verschil tussen de gemodelleerde en gemeten magneetvelden voor elke meetlocatie

Uit de Figuur 12 blijkt dat voor de meetlocatie op 19,7 m vanaf de hartlijn het gemodelleerde magneetveld gemiddeld 0,08 microtesla hoger is dan het gemeten magneetveld.

Voor de zes meters op grotere afstand van de hartlijn (op afstanden waar de veldsterkte varieert rond of lager is dan 0,4 microtesla) is het gemiddelde absolute verschil tussen het gemodelleerde en gemeten magneetveld 0,025 microtesla of lager. Het gemiddelde relatieve verschil tussen de gemeten en gemodelleerde magneetvelden is maximaal $9,9\% \pm 0,8\%$, voor de meter op 49,8 m ten noorden van de hartlijn.

De theoretische onzekerheidsmarge voor de metingen en modelberekeningen in Maartensdijk is bepaald op 28,5% (zie Bijlage 4). Het gemiddelde relatieve verschil $\pm 2 \times$ standaard error valt voor alle meetlocaties binnen de theoretische onzekerheidsmarge.

De met het model berekende 0,4 microteslazone tijdens de analyseperiode bedraagt 29,9 m (zie paragraaf 4.2). De theoretische onzekerheidsmarge geeft een 95%-betrouwbaarheidsinterval rondom deze waarde tussen 25,0 en 34,0 m.

Voor de situatie in Maartensdijk (i.e. onder de onderzochte omstandigheden) mag de theoretische onzekerheidsmarge rondom de grens van de 0,4 microteslazone vervangen worden door het in de praktijk bepaalde gemiddelde relatieve verschil $\pm 2 \times$ standaard error. Dat betekent dat de in de praktijk bepaalde 95%-betrouwbaarheidsgrenzen rondom de bepaalde 0,4 microteslazone smaller zijn dan in de theoretische worst-case-situatie. Als voor de zes meetlocaties waar het magneetveld de waarde 0,4 microtesla benadert een gemiddeld relatief verschil van 10,7% wordt gehanteerd ($9,9\% + 0,8\%$), dan zijn de grenzen van het praktische 95%-betrouwbaarheidsinterval 28,2 en 31,5 m, zie Tabel 4.

Tabel 4 De 0,4 microteslazonen op basis van theoretische onzekerheidsmarge en op basis van de metingen en berekeningen (gemiddelde relatieve verschil $\pm 2 \times$ standaard error), bij de omstandigheden tijdens de metingen

		afstand tot 0,4 microtesla (m)	
		theoretische marge	in de praktijk bepaald
actueel, meting	ondergrens 95%-betrouwbaarheidsinterval	25,0	28,2
	model	29,9	29,9
	bovengrens 95%-betrouwbaarheidsinterval	34,0	31,5

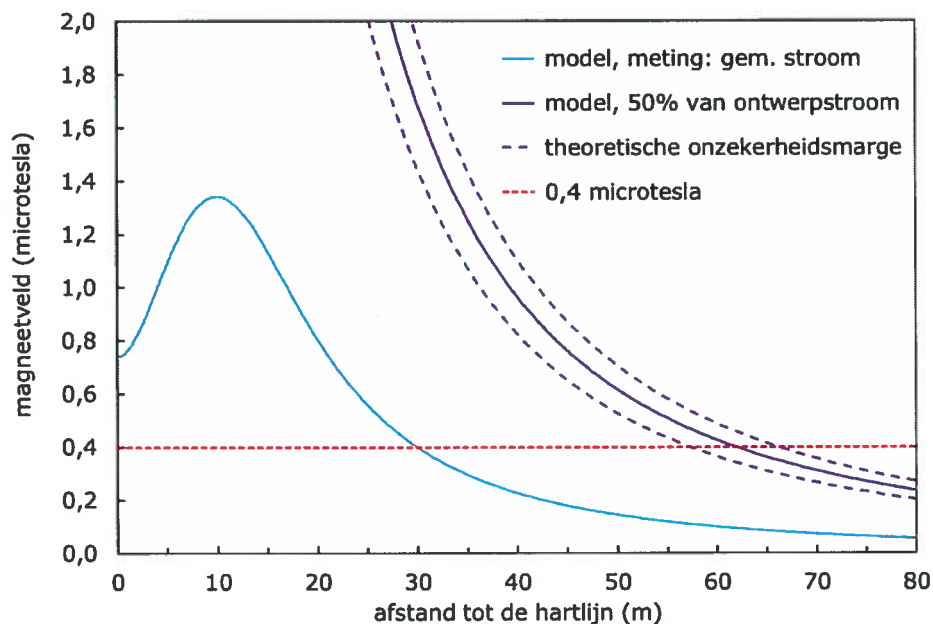
4.4 Betekenis voor specifieke magneetveldzone

De theoretische onzekerheidsmarge voor de omstandigheden tijdens de metingen was 28,5%.

Er is eveneens een theoretische onzekerheidsmarge bepaald voor de denkbeeldige situatie dat de metingen en berekeningen zouden worden uitgevoerd bij een stroom die overeenkomt met 50% van de ontwerpbelasting. Met andere woorden: in de situatie waarvoor de specifieke magneetveldzone wordt berekend conform de Handreiking. Door de hogere stroom is dan de

onzekerheid in de stroommetingen kleiner; dit leidt tot een theoretische onzekerheidsmarge van 14,4% (zie Bijlage 4).

Uit de theoretische onzekerheidsmarge kan een worst-case 95%-betrouwbaarheidsinterval rondom het berekende magneetveldprofiel bij 50% van de ontwerpstroom worden bepaald. In Figuur 14 zijn de grenzen van dit theoretische interval weergegeven als onderbroken lijnen rondom het Handreikingsprofiel (doorgetrokken lijn)



Figuur 14 Gemiddelde gemodelleerde magneetvelden op 18 september 2012 tussen 11:00 uur en 17:00 uur (blauw). Gemiddelde gemodelleerde magneetvelden bij een stroom van 50% van de ontwerpstroom, met 95% spreidingsgrenzen (paars). De spreidingsgrenzen zijn bepaald op basis van theoretische onzekerheidsmarges

Op basis van Figuur 14 kan worden bepaald op welke afstand vanaf het hart van de lijn de waarde 0,4 microtesla wordt bereikt, rekening houdend met de worst-case-theoretische grenzen. In Tabel 5 worden de met het model berekende afstand en de minimale en maximale theoretische 95%-grenzen weergegeven, voor de rekenstroom conform de Handreiking. Deze afstanden worden afgerond op eenheden van 5 m, conform de berekening van de specifieke magneetveldzone.

Tabel 5 De 0,4 microteslazonen in Maartensdijk op basis van theoretische onzekerheidsmarge, bij de rekenstroom volgens het Handreikingsprofiel (50% van de ontwerpstroom)

		afstand tot 0,4 microtesla (m)	specifieke magneetveldzone (m)
actueel, meting	model	29,9	n.v.t.
reken- stroom	ondergrens 95%- betrouwbaarheidsinterval	57,2	55
	model	61,9	60
	bovengrens 95%- betrouwbaarheidsinterval	66,0	65

Wanneer er een heel jaar magneetveldmetingen zouden worden uitgevoerd in Maartensdijk bij een constante belasting die gelijk is aan de rekenstroom, dan zal theoretisch gezien in 95% van die metingen de waarde 0,4 microtesla worden bepaald tussen 57,2 en 66,0 m.

Bij het validatieonderzoek bleek dat de onzekerheidsmarge rondom de met het model berekende waarde in de praktijk kleiner was dan theoretisch maximaal verwacht kan worden. Als wordt aangenomen dat dit ook geldt wanneer de stroom gelijk is aan de rekenstroom (50% van de ontwerpstroom, dan volgt daaruit dat de specifieke magneetveldzone op basis van de berekening conform de Handreiking maximaal 5 m kan afwijken van de magneetveldzone op basis van metingen.

5 Discussie

5.1 Vergelijking gemeten en gemodelleerde magneetvelden

In dit rapport is voor een willekeurig gekozen locatie bij een hoogspanningslijn in Nederland op een willekeurig gekozen dag een vergelijking gemaakt tussen gemeten en gemodelleerde magneetvelden. Uit de resultaten blijkt dat in dit geval de gemeten en gemodelleerde magneetvelden voldoende overeenkomen, rekening houdend met de onzekerheid in gemeten en gemodelleerde magneetvelden. De verschillen vallen binnen de grenzen van de theoretische onzekerheidsmarge.

De theoretische onzekerheidsmarge resulteert in een interval rondom de 0,4 microtesla-afstand. Zowel in de situatie tijdens de metingen als in de situatie op basis waarvan de specifieke magneetveldzone wordt berekend geldt dat de grenzen van dit interval kleiner zijn dan 5 m aan weerszijden van de gemiddelde waarde.

Dit betekent dat de nauwkeurigheid van de metingen en modelberekeningen valt binnen de marge van ± 5 m die het ministerie van IenM in de uitvoeringspraktijk van het voorzorgsbeleid rond hoogspanningslijnen acceptabel acht. Voor het berekenen van de specifieke magneetveldzone op basis van de Handreiking kunnen verschillende rekenmodellen worden gebruikt. Eén van de eisen die aan deze rekenmodellen wordt gesteld is dat de berekende (niet-afgeronde) zone in een aantal standaardsituaties maximaal 5 m mag afwijken van de gemiddelde berekende waarde.

Toelichting

Bij het uitvoeren van magneetveldmetingen en modelberekeningen is er in de praktijk sprake van onzekerheid in de resultaten. Deze onzekerheid wordt bijvoorbeeld veroorzaakt door onnauwkeurigheid van gebruikte meetapparatuur, onnauwkeurigheid door aannames en vereenvoudigingen in het gebruikte rekenmodel en afwijkingen door bijvoorbeeld weersomstandigheden. Het schatten van de theoretische onzekerheidsmarge brengt hierbij in kaart hoe groot deze onzekerheid is op basis van worst-case-uitgangspunten. Zowel voor de situatie tijdens de metingen als voor de denkbeeldige situatie dat de stroom jaargemiddeld gelijk is aan 50% van de ontwerpstroom (het uitgangspunt voor de berekening van de specifieke magneetveldzone volgens de Handreiking) is een theoretische onzekerheidsmarge bepaald. Hierbij dient wel te worden opgemerkt dat de stroom tijdens de metingen laag was, wat leidde tot een relatief grote (standaard)onzekerheid van 13,0% in de stroommetingen. De uiteindelijke theoretische onzekerheidsmarge tijdens de metingen is hiermee 28,5%. De theoretische onzekerheidsmarge bij 50% van de ontwerpstroom is 14,4%.

De onzekerheid in de resultaten van magneetveldmetingen en modelberekeningen in Maartensdijk is kleiner dan de theoretische onzekerheidsmarge. Bovendien geldt dat voor de locaties op enige afstand van de hartlijn (waar het magneetveld circa 0,4 microtesla is of lager) het absolute verschil tussen gemeten en gemodelleerd magneetveld gemiddeld kleiner is dan 0,025 microtesla. Ter vergelijking: de magneetveldmeter meet de veldsterkte in stapjes van 0,01 microtesla.

De overeenkomst tussen de gemeten en gemodelleerde magneetvelden lijkt op grotere afstand van de geleiders beter te zijn dan dichtbij. Voor een meetlocatie dicht bij de geleiders werden met het model hogere gemodelleerde magneetvelden berekend dan de overeenkomstige meetwaarden. Hiervoor zijn twee mogelijke oorzaken (of een combinatie van deze twee oorzaken) aan te geven:

- het rekenmodel gaat uit van een lineair verband tussen magneetveld en stroom. Strikt genomen geldt dit alleen op grote afstand van de lijn, wanneer de individuele geleiders als één bron kunnen worden beschouwd. Dicht bij de geleiders kan de invloed van individuele geleiders op het uiteindelijke magneetveld merkbaar worden; het gemeten magneetveld is dan niet lineair afhankelijk van de stroomsterkte (zoals in het gemodelleerde magneetveld wel het geval is);
- dicht bij de geleiders heeft een kleine afwijking in de meetpositie een groter effect op het magneetveld dan op grotere afstand van de geleiders.

Voor het berekenen van de specifieke magneetveldzone is dit echter niet van belang, omdat de grens van deze zone altijd op een relatief grote afstand van de geleiders zal liggen.

5.2 Monitoren van stroombelasting

De specifieke magneetveldzones van hoogspanningslijnen met twee circuits worden berekend volgens de Handreiking bij een bepaalde stroombelasting van die lijn, namelijk:

- 30% van de ontwerpbelasting van 380 kV- en 220 kV-lijnen;
- 50% van de ontwerpbelasting van 150 kV- en 110 kV-lijnen.

Hierbij wordt uitgegaan van de aanname dat de jaargemiddelde stroom door deze lijnen niet hoger is dan 30% respectievelijk 50%. Voor het praktijkvoorbeeld bleek dit in 2012 inderdaad te gelden: de jaargemiddelde stroom door de 150 kV-hoogspanningslijn in Maartensdijk was in 2012 94 A (10% van de ontwerpbelasting).

In het verlengde daarvan kan men veronderstellen dat het monitoren van de daadwerkelijke stroom door een lijn voldoende is om te waarborgen dat de jaargemiddelde stroom door de lijn beneden de 30% respectievelijk 50% blijft. Als dit het geval is, dan volgt hieruit dat de actuele 0,4 microteslazone (op basis van de daadwerkelijke jaargemiddelde stroom) smaller is dan de berekende specifieke magneetveldzone.

Bij het monitoren van de stroombelasting wordt gebruikgemaakt van de gegevens die volgen uit de metingen van stroom en spanning in het station en de daarop volgende bewerkingsstappen in de meetomvormer. Deze metingen en bewerkingsstappen brengen echter een bepaalde onzekerheid met zich mee, die afhankelijk is van de stroomsterkte (zie Bijlage 3). Deze onzekerheid kan vooral belangrijk zijn wanneer de jaargemiddelde stroom de 30% of 50% van de ontwerpstroom benadert.

Dit betekent het volgende. Als er in Maartensdijk metingen en modelberekeningen zouden worden uitgevoerd terwijl de stroom 50% van de ontwerpstroom is, dan zal (op basis van worst-case-theoretische gronden) in 95% van de gevallen een 0,4 microteslazone worden bepaald die tussen 57,2 m en 66,0 m aan weerszijden van de hartlijn ligt. De niet-afgeronde specifieke magneetveldzone is 61,9 m. Dit houdt in dat de 95%-onzekerheidsmarge kleiner

is dan 5 m, de marge die binnen het hoogspanningslijnenbeleid van het ministerie van IenM acceptabel wordt geacht.

Hieruit volgt dat monitoren van de stroombelasting voldoende is om te waarborgen dat in Maartensdijk de actuele jaargemiddelde 0,4 microteslazone niet breder is dan de (niet-afgeronde) specifieke magneetveldzone, rekening houdend met de acceptabele marge. Of dit ook het geval is op andere locaties bij andere hoogspanningslijnen kan echter niet op basis van dit onderzoek worden gezegd.

6 Conclusies

Het RIVM trekt de volgende conclusies naar aanleiding van het onderzoek in Maartensdijk:

- De in dit rapport beschreven analysemethode is geschikt om magneetveldmetingen en gemodelleerde magneetvelden bij hoogspanningslijnen te vergelijken. In dit onderzoek bleek dat de gemeten en gemodelleerde magneetvelden in Maartensdijk voldoende overeenkomen.
- De overeenkomst tussen de gemeten en gemodelleerde waarden van het magneetveld is voor deze situatie op grotere afstand vanaf de hartlijn (waar het magneetveld ongeveer 0,4 microtesla is of lager) beter dan dicht bij de hartlijn.
- Wanneer er een heel jaar magneetveldmetingen zouden worden uitgevoerd in Maartensdijk bij een constante stroom die gelijk is aan 50% van de ontwerpstroom, dan zal de daaruit bepaalde 0,4 microteslazone maximaal 5 m afwijken van de met de Handreiking berekende specifieke magneetveldzone. Dit valt binnen de marge van ± 5 m die binnen het hoogspanningslijnenbeleid van het ministerie van IenM acceptabel wordt geacht.
- Voor de situatie in Maartensdijk is monitoren van de stroombelasting voldoende om te waarborgen dat de daadwerkelijke 0,4 microteslazone niet breder is dan de met de Handreiking berekende (niet-afgeronde) magneetveldzone, binnen de marge van ± 5 m die binnen de uitvoeringspraktijk van het voorzorgsbeleid rond hoogspanningslijnen door het ministerie van IenM acceptabel wordt geacht.

Referenties

- 1 Ministerie van VROM. Advies (en bijlage) met betrekking tot hoogspanningslijnen van staatssecretaris Van Geel van VROM aan Colleges van Burgemeester en Wethouders, Colleges van Gedeputeerde Staten, IPO, VNG, EnergieNed, Netbeheerders Elektriciteit, gedateerd 3 oktober 2005, kenmerk SAS/2005183118. Zie onderaan webpagina www.rivm.nl/Onderwerpen/Onderwerpen/H/Hoogspanningslijnen.
- 2 Ministerie van VROM. Verduidelijking advies met betrekking tot hoogspanningslijnen. Brief minister Cramer van VROM, gedateerd 4 november 2008, kenmerk DGM/2008105664. Zie onderaan webpagina www.rivm.nl/Onderwerpen/Onderwerpen/H/Hoogspanningslijnen.
- 3 Kelfkens, G. en M.J.M. Pruppers. Handreiking voor het berekenen van de breedte van de specifieke magneetveldzone bij bovengrondse hoogspanningslijnen. Versie 4.0, RIVM, 3 november 2014.
- 4 KNMI. Weergegevens in De Bilt, zoals weergegeven op de website <http://www.knmi.nl/klimatologie/daggegevens/>
- 5 Baumann, J. en S. Joss. Hochspannungsleitungen. Vollzugshilfe zur NISV. Vollzugs-, Berechnungs- und Messempfehlung. Entwurf zur Erprobung, Juni 2007 Umwelt-Vollzug. Bundesamt für Umwelt, Bern, 2007.

Bijlage 1 Veldwerkprotocol voor het meten rond hoogspanningslijnen

Het veldwerkprotocol is een opsomming van achtereenvolgens de benodigde materialen, de voorbereidingen die vooraf moeten worden getroffen, de procedures in het veld en de procedures voor het uitlezen, opslaan en beschrijven van de metingen.

1. Checklist materialen

- 11 veldsterktemeter type EMDEX Lite (Eneritech, Californië, VS), nummers: 105006 t/m 105013 en 105049 t/m 105051, (1 x 9V batterij/meter)
- 12 *environmental pouches*
- 12 waterdicht kistje, type GSI Outdoors Lexan gear box S GS73506 (small)
- 12 plastic zakje van afmeting buitenkant kistje (bijvoorbeeld grote boterhamzakjes AH)
- 20 9V batterij merk Duracell
- 1 GPS type Garmin Etrex 30, S/N 2DV007872 (2 x 1,5V batterijen AA)
- 10 1,5V AA batterij
- 7 GPS loggers type Adapt AD-850 (mobiele telefoonaccu)
No's 3, 4, 6, 5, 7, 8, 9
- 1 laserafstandmeter type Bosch PLR 25, S/N 205516559
(4 x 1,5V batterijen AAA)
- 10 1,5V AAA batterij
- 1 meetlint van 15 m
- 2 digitaal horloge (merkloos)
- 1 veldwerkdagboek van papier
- 1 notitieblok A4
- 12 blauwe pen
- 2 potlood
- 1 puntenslijper
- 3 onuitwisbare markeerpen, dik, zwart
- 2 vel van 12 zelfplakkende etiketten
- 1 rol touw van 140 m
- 1 schaar
- 1 stanleymes
- 4 rol ducttape
- 1 nietpistool met nietjes
- 11 rondpaal, 6 cm, 140 cm lang
- 1 voorhamer van 4 kg
- 1 grondboor, type Edelman 60 mm (geleend van Bert van Dijk 2257)
- 11 rubberen terrastegel, groen 400x400x25 mm
- 1 doosje spijkers 40 mm, 250 stuks
- 1 klauwhamer
- 1 nijptang
- 3 stevige sjouwtaas (Ikea blauwe tas) voor tegels
- 1 rugzak voor rondpalen
- 2 herbruikbare boodschappentas ('big shopper') voor waterdichte kistjes met meters
- 2 rugzakje voor overig materiaal
- 1 laptop met opgeladen accu en internetmogelijkheid over telefoonnetwerk
- 1 mobiele telefoon met opgeladen accu
- 1 digitale camera met opgeladen accu

- 1 zaklamp
- 4 batterij voor zaklamp
- 1 verbanddoos

En vergeet niet voor de persoonlijke verzorging:

- 2 fles water van 1,5 liter (per dag per persoon)
- 2 maaltijd per dag per persoon
- 1 paraplu/regenkleding per persoon
- 1 paar laarzen
- 1 set veldwerkkleding
- 1 boek/stapel artikelen
- 1 stoel
- 1 zeil
- 1 handenreiniger
- 1 doekje
- 1 strip hoofdpijntabletten

2. Voorbereiden

Logboek in gebruik nemen

Het veldwerklogboek bevat ten minste:

- naam, tijd, datum en locatie van veldwerk
- namen van alle veldwerkers en tijdstippen van hun aanwezigheid
- alle informatie (afstanden) die in het veld gemeten wordt, wat (taak en object), wanneer (tijd in HH:MM:SS – YYMMDD) en door wie
- alsmede alle opvallende zaken, zoals kapot of ontbrekend materiaal of afwijkende procedures en acties met hun reden

Meetlocatie uitkiezen

1. zoek op de netkaart een bovengrondse hoogspanningslijn en kies met behulp van een kaart, bijvoorbeeld GoogleEarth, een terrein waarvoor geldt:
 - makkelijk toegankelijk voor transport van veldwerkmaterialen
 - onbewoond en onbebouwd, bij voorkeur een akker
 - goed begaanbaar, aaneengesloten zonder onderbrekingen zoals bomenrijen of sloten en met de mogelijkheid palen in de grond te slaan
 - slecht zichtbaar vanaf de openbare weg in verband met mogelijk vandalisme of diefstal van het materiaal
 - kies een veldwerkperiode
2. vraag de netwerkbeheerder:
 - of hij toestemming kan geven en kan regelen met de grondeigenaar om daar te gaan meten
 - of hij de exacte locaties van de kabels, masten en mastbeelden kan geven
 - of er historische belastinggegevens zijn om de ideale opstelpunten van de meters mee te plannen
 - of er op de geplande meetdagen met zekerheid de vijfminutenbelastinggegevens van alle circuits zullen worden opgeslagen en doorgegeven
3. neem contact op met de grondeigenaar om af te stemmen:
 - wanneer en hoe je zijn terrein zult betreden
 - of je gebruik mag maken van eventuele voorzieningen, bijvoorbeeld toilet, drinkwater of stroom
 - dat het terrein niet in gebruik zal zijn op de meetdagen, dus dat er geen vee of gewassen op het terrein staan of werkzaamheden of evenementen plaatsvinden

- dat er geen andere bronnen van magneetvelden zijn, zoals bijvoorbeeld leidingen of kabels die door of over de grond lopen
4. bezoek het terrein en:
- doe een visuele inspectie of het inderdaad voldoet aan alle voorwaarden
 - loop in een grid met een GPS logger en een EMDEX Lite over het terrein om te controleren of er andere bronnen van magneetvelden, bijvoorbeeld ondergrondse kabels of leidingen, aanwezig zijn die de metingen kunnen verstoren
 - maak foto's van het terrein en de toegang om het veldwerk makkelijker te kunnen plannen

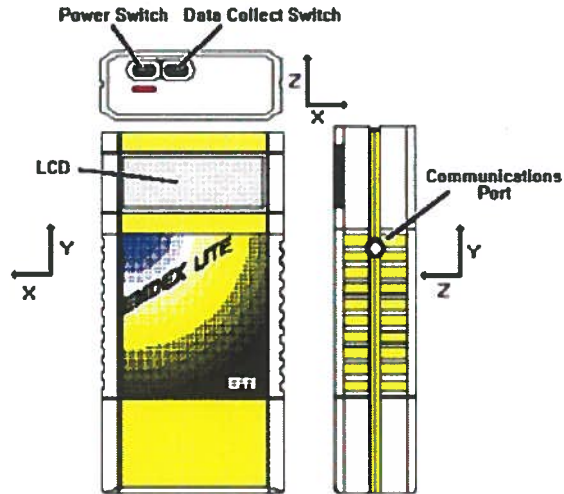
Meetplan

Stel een meetplan op met locaties van het lijnstuk en de ideale opstelpunten van de meters; bepaal de ideale opstelpunten aan de hand van:

- modellering van de 0,4-microteslazone op basis van belastinggegevens
- gemeten zone tijdens de gridloop
- gebruik locaties van lijn van de netwerkbeheerder en vergelijk deze met de kaart

Materiaal

- twee weken van tevoren:
 - zorg dat er een tijdschema is met mensen die hebben bevestigd dat ze deelnemen aan het transport, opstellen en afbreken van de meetopstelling of bewaking van de meetinstrumenten tijdens het veldwerk
 - controleer en reserveer de aanwezigheid en beschikbaarheid van het veldwerk materiaal en vul eventueel aan, zie 'Checklist materialen'
 - reserveer transport/huur een auto voor de dag van opzetten en voor de dag van afbreken
- twee dagen van tevoren:
 - laat de grondeigenaar weten dat het veldwerk doorgaat en controleer nogmaals of het terrein voldoet
 - laat de netwerkbeheerder weten dat het veldwerk doorgaat en controleer nogmaals of de lijn in gebruik is zonder onderhoud of uitzonderlijke omstandigheden en of de belastinggegevens worden gemeten
 - configureer de EMDEX Lites volgens de procedures in 'Uitlees-protocol_GPS_E_120920.doc'
 - laad de GPS loggers op
 - laad de mobiele telefoon, de laptop en de camera op
 - vervang eventueel de batterijen in de Garmin GPS en de laserafstandmeter
 - zet de tijd op de digitale horloges tot op de seconde gelijk met de computerklok van het RIVM netwerk
- één dag van tevoren:
 - maak de EMDEX-meters klaar voor het veld:
 - stop batterijen in de EMDEX en zet met onuitwisbare marker een diagonale streep op de batterij; als er al twee diagonale strepen op de batterij staan, gebruik dan een nieuwe batterij
 - AANZETTEN: de EMDEX LITE (zwarte meter) heeft aan de korte bovenkant twee schakelaars: de hoofdschakelaar (Power Switch) en de schakelaar voor 'data collect' (Data Collect Switch); zet de meter aan door beide schakelaars naar rechts te schuiven; het display zal iedere vier seconden de magnetische fluxdichtheid in milligauss weergeven



- NOTA BENE: schakel de EMDEX LITE nooit uit, ofwel ZET DE HOOFDSCHAKELAAR (Power Switch) NOOIT IN DE OFF STAND; de opgeslagen meetresultaten gaan dan verloren
- schrijf met onuitwisbare marker de laatste twee cijfers van het EMDEX-nummer op een etiket
- plak het etiket op een waterdicht kistje aan de knijperzijde
- stop de EMDEX in een *environmental pouch*
- stop de EMDEX met *pouch* in het kistje
- vergrendel het kistje
- laad alle materialen in de auto

3. Procedures in het veld

Meters opstellen

- zet de palen op de juiste positie:
 - bepaal met behulp van de Garmin Etrex 30 GPS eerst de posities van de middelste en de verste palen aan weerszijden haaks op de lijn. Plaats de andere palen relatief van deze drie, aangezien de GPS een afwijking van 5 m kan hebben
 - maak met de grondboor een gat, zet de paal erin en sla deze vast met de voorhamer
 - zet de andere palen op een rechte lijn hiertussen de eerste drie op de in het meetplan voorgeschreven relatieve afstanden met behulp van een meetlint of de laserafstandmeter. Lijn uit door een touw tussen deze palen te spannen of laat iemand in een rechte lijn langs de palen kijken
- leg de rubberen tegel gecentreerd bovenop de paal en bevestig deze met vijf spijkers of draadnagels met een grote kop
- bevestig het kistje aan de paal die het meetplan aangeeft:
 - meet met het meetlint vanaf de grond langs de paal een hoogte van één meter boven het maaiveld af en markeer dit op paal
 - doe een plastic zakje om het kistje, met de opening naar de lengte-as
 - bevestig het kistje met de knijperzijde en etiketzijde naar beneden, de lengte-as op het 1-meterpunt, aan de noordkant van de paal (i.v.m. het voorkomen van opwarming door direct zonlicht) met twee slagen ducttape over de lengte-as aan de paal.
 - bevestig met een nietpistool de ducttape aan de achterkant aan de paal om loslaten of slippen te voorkomen

- niet aan de eerste, de middelste en de laatste paal een mededeling in plastic aan de paal over:
 - de aard van het veldwerk
 - contactgegevens van het RIVM
 - telefoonnummer en naam van contactpersoon
- noteer in het dagboek het tijdstip dat alles is opgesteld; vanaf dan begint de meetperiode

Posities bepalen

- bepaal de absolute locatie van de opstelpunten:
 - zet de Adapt GPS logger aan
 - meet de absolute locatie van de palen in. Leg tegelijk of opeenvolgende op het midden van de rubberen tegel van iedere paal gedurende tien minuten een GPS logger; schrijf in het logboek:
 - de begin- en de eindtijd
 - het nummer van de GPS logger
 - het nummer van de EMDEX zoals op etiket van het waterdichte kistje staat
- bepaal de absolute positie van de masten:
 - meet de masten op dezelfde manier als de palen in door gedurende tien minuten een GPS logger op het midden van de sokkel te leggen of 4x vijf minuten op de vier hoeken
- bepaal de hoogte van de zeeg van beide circuits:
 - wacht tot het donker is
 - zet de laserafstandmeter op een rubberen tegel onder de positie van de middelste kabel van een circuit
 - schiet de draad tien keer aan en schrijf de uitkomsten met het tijdstip in het logboek
- fotografeer:
 - het terrein
 - de hoogspanningslijn
 - de lijn opgestelde paaltjes
 - de masten met identificatieplaat
 - één paaltje met kistje en nummer ingezoomd

Veiligheid

- bewaak de meetinstrumenten, deze zijn kostbaar (pm € 1500 per stuk) net als de metingen en veldwerktijd.
- spreek mensen aan als ze de veldwerklocatie naderen of de veldwerkapparatuur aanraken, maar bedenk dat je eigen veiligheid belangrijker is dan de meetinstrumenten
- eigen veiligheid gaat voor alles, dus zorg voor:
 - voldoende eten en drinken (3 liter p.p. per dag)
 - bescherming tegen de weersomstandigheden, zoals een trui, regenjas en zonnebrand)
 - een verbanddoos en pijnstillers
 - een mobiele telefoon met opgeladen accu, zodat je altijd om hulp kan vragen als je bijvoorbeeld onwel wordt of onraad ruikt

Opbreken:

- noteer de tijd dat het veldwerk eindigt (meestal een veelvoud van 24 uur na het begin)
- breek af:
 - snijd de ducttape door met het stanleymes en trek de kistjes van de paal en stop ze in een 'big shopper'

- trek voorzichtig met een nijptang de spijkers uit de tegel alvorens de tegel op te lichten en stop ze in een sjouwtas en doe de spijkers terug in een doosje
- trek de palen uit de grond en stop ze met de puntige kant omhoog in de rugzak
- berg al het overig materiaal op in de rugzakjes
- vink het materiaal af op de checklist
- laad alles in de auto
- kijk nog eens om je heen of je wat vergeten bent
- bel/mail/SMS aan de veldwerkcoördinator dat je klaar bent en vertrekt

Aanvullen

- loop de materialenchecklist af
- leg alles weer netjes terug in de opslag
- vul aan wat verbruikt is
- vervang in overleg met de projectcoördinator wat kapot of verloren is gegaan

4. Metingen beschrijven

Uitlezen

- lees data uit en sla ze op volgens Uitlees-protocol_GPS_EMDEX_120920.doc

Beschrijvende statistiek

- opstelpunten:
 - neem als absolute locatie van de opstelpunten en de mastlocaties de gemiddelde en standaardafwijking van het gemiddelde van de GPS loggerdata
 - vergelijk de relatieve afstanden met de relatieve afstanden uitgezet met het meetlint/laserafstandmeter
- zeeg:
 - neem als hoogte boven maaiveld de gemiddelde waarde van de tien herhaalde metingen
 - vergelijk dit met de data van de provider
- metingen van magnetische fluxdichtheid
 - zet de gemeten waarden in milligauss om naar de rapportage eenheid microtesla
 - interpoleer alles van 4 naar 1 secondemetingen, opdat gegevens tussen meetlocaties kunnen worden vergeleken ondanks dat iedere meter op een ander moment aangezet werd
 - plot per opstelpunt:
 - spreiding in histogram
 - spreiding als cumulatieve verdeling
 - B-veld vs. tijd
 - plot tegelijk
 - 3D B-veld vs. tijd vs. opstelpunt
 - spreiding als box-and-whisker plot per opstelpunt
 - maak tabellen per opstelpunt met:
 - gemiddelde, standaarddeviatie, geometrisch gemiddelde, geometrische standaarddeviatie en percentielen (0, 5, 25, 50, 75, 95, 99, 100%)

Beschrijving van metingen

- beschrijving van uitvoering metingen
- leerpunten: wat ging anders dan gepland en waarom?
- bijstelling veldwerkprotocol nodig?
- uitkomsten logisch of niet? Opmerkelijk, rekening houden met tijdens analyseren

Bijlage 2 Configuratiegegevens hoogspanningslijn

Door het TenneT Asset Informatieloket zijn voor de masten 19 en 20 van de hoogspanningsverbinding Utrecht Lage Weide - Soest de volgende gegevens verstrekt.

Masten

mast	uitvoering	hoogte (m)	RDX	RDY
ULW-SOS150.19	S+0	52	140601	462248
ULW-SOS150.20	S+0	52	140925	462292

Veldlengte (afstand mastmiddens): 327,0 m

Geleiders

- De fasegeleiders zijn van het type ACSR 495,6 mm².
- De bliksemraden zijn van het type MINORCA 88,9 mm².

Ontwerpstroom

De ontwerpstroom is per circuit 966 A.

Doorhang

De doorhang van de geleiders tussen mast 19 en 20 bedraagt 10,1 m bij een geleidertemperatuur van 15°C.

circuit zwart	hoogte boven maaiveld midspan (m)
fase onder links	10,63
fase boven	16,63
fase onder rechts	10,63

circuit wit	hoogte boven maaiveld midspan (m)
fase onder links	10,63
fase boven	16,63
fase onder rechts	10,63

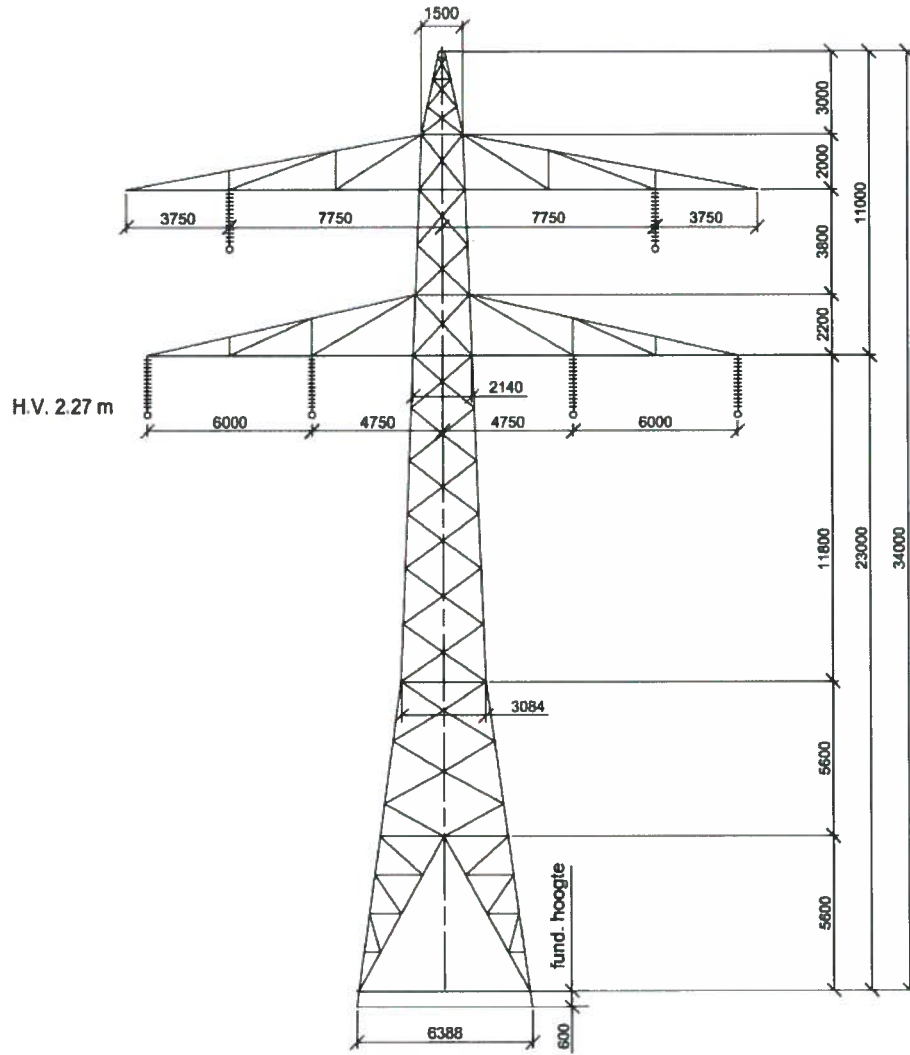
Klokgetallen

De klokgetallen voor de verbinding Utrecht Lage Weide – Soest zijn:

positie	klokgetal circuit zwart	klokgetal circuit wit
fase onder links	4 (120°)	4 (120°)
fase boven	12 (0°)	12 (0°)
fase onder rechts	8 (240°)	8 (240°)

Mastbeeld

De overige gegevens (ophanghoogte geleiders, laterale afstand) zijn ontleend aan de afmetingen in het mastbeeld:



Bijlage 3 Bepaling onzekerheid in meting stroomsterkte

Gegevens stroommetingen

Het magneetveld op een locatie bij een hoogspanningslijn is onder andere afhankelijk van de afstand van die locatie tot de geleiders, de onderlinge configuratie van de geleiders (en de fasenhoek) en de stroom door elke geleider ter hoogte van de locatie. Omdat de stroom door de geleiders tussen mast 19 en mast 20 niet rechtstreeks gemeten kan worden, is gebruikgemaakt van stroommetingen (van TenneT) in station Soest, bij de aansluitingen van de circuits richting station Utrecht Lage Weide.

Door de hoge spanning en stroom is ook in het station een directe meting in de praktijk niet mogelijk: stroom en spanning worden eerst omlaag getransformeerd om gemeten te kunnen worden. Dit gebeurt met zogenoemde stroom- en spanningstransformatoren. Op deze manier wordt voor elke fase elke vier seconden de spanning en stroom gemeten. In de meetwaardeomvormer op het station worden uit deze gegevens de lijnspanning, lijnstroom, het vermogen P (in MW) en het blindvermogen Q (in MVar) bepaald.

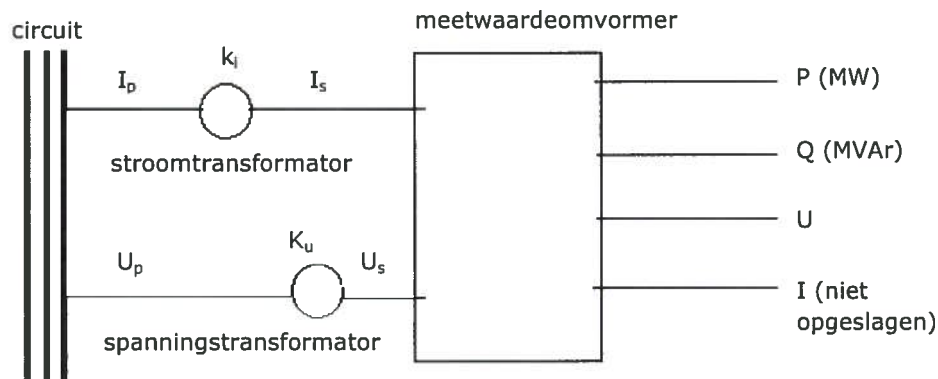
Elke vijf minuten slaat het Energy Management Systeem van TenneT de meetwaarden van het dichtstbijzijnde meettijdstip op in een tijdelijk bestand. Vervolgens worden na elke 24 uur de vijfminutenwaarden van de lijnspanning, het vermogen en het blindvermogen opgeslagen in een definitief bestand; de vijfminutenwaarden voor de stroom kunnen uit deze waarden worden berekend. TenneT heeft vanuit het definitieve bestand de vijfminutenwaarden voor spanning, vermogen en blindvermogen gedurende de meetdag geleverd aan het RIVM voor de analyse.

Meetonnauwkeurigheid stroommetingen algemeen

De onnauwkeurigheid van de stroommetingen wordt bepaald door de onnauwkeurigheid van de bepaling van de spanning U, het werkelijke vermogen P en het blindvermogen Q en de rekenkundige bewerking die nodig is om hieruit de stroom te berekenen met de formule:

$$I = \frac{\sqrt{(P^2 + Q^2)}}{U \cdot \sqrt{3}}$$

Het transformatie- en meetproces dat uiteindelijk de P (in watt), Q (in volt.ampère reactief), U (in volt) en I (in ampère) oplevert is in Figuur 15 weergegeven. De gemeten stroomwaarden worden niet opgeslagen en moeten daarom volgens bovenstaande formule uit P, Q en U berekend worden. Dat betekent dat de onnauwkeurigheid in de stroom niet direct uit die in de stroomtransformator en de meetwaardeomvormer kan worden bepaald, maar indirect uit de onnauwkeurigheid in P, Q en U berekend moet worden.



Figuur 15 Schema met daarin de stappen in het meetproces die bijdragen aan de meetonnauwkeurigheid in U, P en Q en uiteindelijk aan de onnauwkeurigheid in de teruggekende stroom

In het proces zijn drie aparte stappen die bij kunnen dragen aan de uiteindelijke meetonnauwkeurigheid: het transformeren en meten van de stroom, het transformeren en meten van de spanning en het meet- en rekenproces in de meetwaardeomvormer (zie Figuur 15). De onnauwkeurigheid in U wordt bepaald door die in de spanningstransformator en die in de meetwaardeomvormer. Voor P en Q zijn de onnauwkeurigheden in de stroomtransformator, de spanningstransformator en de meetwaardeomvormer van belang.

Spanningstransformator

Spanningstransformatoren introduceren twee soorten onnauwkeurigheden: een amplitudfout (uitgedrukt in %) en een hoekfout. De totale meetfout wordt feitelijk door beide fouten bepaald. Omdat we vooral geïnteresseerd zijn in de grootte van de spanning verwaarlozen we de hoekfout. NEN-EN-IEC 61869-3 deelt spanningstransformatoren in verschillende nauwkeurigheidsklassen in. Omdat de gemeten spanning in een reguliere bedrijfssituatie tussen de 80% en 120% van de nominale spanning ligt, kunnen we voor de spanningstransformatie uitgaan van één vaste meetnauwkeurigheid, bijvoorbeeld 0,2% voor een transformator van klasse 0,2.

Stroomtransformator

Net als spanningstransformatoren introduceren stroomtransformatoren amplitudfouten en hoekfouten. Ook hier verwaarlozen we de bijdrage van de hoekfouten. NEN-EN-IEC 61869-3 deelt ook stroomtransformatoren in verschillende nauwkeurigheidsklassen in. Als meetbereik voor stroomtransformatoren wordt meestal een bereik tussen 0% en 120% van de nominale stroom gehanteerd. Echter, omdat de meetnauwkeurigheid van de stroomtransformator afhangt van de grootte van de gemeten stroom, is de situatie hier ingewikkelder dan bij de spanningsmeting. In de praktijk moet bij elke stroomwaarde de meetonnauwkeurigheid apart worden bepaald op basis van de specificaties in NEN-EN-IEC 61869-3. Een verdere complicatie is dat er voor de gangbare stroomtransformatoren geen nauwkeurigheid is aan te geven bij een stroom die kleiner is dan 5% van de nominale stroom.

Meetwaardeomvormer

Meetwaardeomvormers die momenteel worden geïnstalleerd, hebben een maximale onnauwkeurigheid van 0,2% Full Scale (Fs) voor U en I. Deze manier van opgeven van de meetonnauwkeurigheid betekent dat voor een

spanningsmeter met een Full Scale van 150 kV (bij 0,2% Fs) de onnauwkeurigheid in de spanning 0,3 kV bedraagt, onafhankelijk van de grootte van de gemeten spanning. De absolute onnauwkeurigheid in de spanning is constant en de relatieve onnauwkeurigheid zal groter zijn naarmate de waarde van de spanning lager is. Voor de P en Q wordt uitgegaan van 0,5% Fs. Voor oudere stations kan de meetonnauwkeurigheid groter zijn, tot 5% Fs voor U en I.

Meetonnauwkeurigheid stroommeting Maartensdijk

Specificaties meetapparatuur

In Tabel 6 zijn de specificaties van de in station Soest gebruikte meetapparatuur weergegeven.

Tabel 6 Gegevens meetapparatuur station Soest (identiek voor circuit wit en circuit zwart; Bron: TenneT)

stroomtransformator	merk type meetkern	Balteau SEX 150 overzetverhouding 1600/1A klasse 1 N ≤ 5 40VA
spanningstransformator	merk type wikkeling	Balteau UEV 150 150.000/√3 100/√3 klasse 0,2 100VA
meetwaardeomvormer	merk type nauwkeurigheid in I en U nauwkeurigheid in P en Q	Sprecher E-C 0,2% 0,5%

Onnauwkeurigheid in opgeslagen waarden voor U, P en Q

De spanningstransformator in station Soest van de 150 kV-lijn in Maartensdijk heeft een nauwkeurigheidsklasse 0,2 en een overzetverhouding van 1500 (primaire zijde 150 kV komt overeen met secundaire zijde 100 V). In feite worden de fasenspanningen gemeten, waaruit de lijnspanning kan worden afgeleid. Omdat de gemeten spanning in een reguliere bedrijfssituatie tussen 80% en 120% van de nominale spanning (150 kV) ligt, introduceert deze spanningstransformator een vaste meetonnauwkeurigheid van 0,2% in de stroomwaarde.

De meetwaardeomvormer in station Soest heeft een nauwkeurigheid van 0,2% Fs voor het meten van de spanning en de stroomsterkte. Dit betekent dat de onnauwkeurigheid in de gemeten spanning 300 V bedraagt. Als de lijnspanning varieert tussen 120 kV en 180 kV (80-120% van de nominale spanning), dan gedraagt de onnauwkeurigheid in de spanning zich zoals weergegeven in Tabel 7.

Tabel 7 Onnauwkeurigheid in de gemeten spanning volgens NEN-EN-IEC 61869-3 voor de 150 kV-lijn in Maartensdijk met een nominale spanning U_n van 150 kV

% U_n	fasespanning (kV)	fasespanning secundaire zijde spannings-transformator (V)		presentatie lijnspanning na meetomvormer (kV)	
		min	max	min	max
80	$120/\sqrt{3}$	$79,84/\sqrt{3}$	$80,16/\sqrt{3}$	119,46	120,54
100	$150/\sqrt{3}$	$99,80/\sqrt{3}$	$100,20/\sqrt{3}$	149,40	150,60
120	$180/\sqrt{3}$	$119,76/\sqrt{3}$	$120,24/\sqrt{3}$	179,34	180,66

De stroomtransformator in station Soest is van nauwkeurigheidsklasse 1 en heeft een overzetverhouding van 1600 (primaire zijde 1600 A, secundaire zijde 1 A). Voor deze nauwkeurigheidsklasse geldt voor de meetnauwkeurigheid in de stroom (specificaties volgens NEN-EN-IEC 61869-3):

% van nominale stroom	stroom (A)	onnauwkeurigheid (%)
5	80*	3
20	240	1,5
100	1600	1
120	1840	1

* bij stroomwaarden lager dan 80 A is de nauwkeurigheid van de stroomtransformator niet bekend

De meetwaardeomvormer in station Soest heeft een nauwkeurigheid van 0,2% F_s , oftewel 3,2 A. De onnauwkeurigheid in de gemeten stroom die hieruit volgt voor de metingen in station Soest is weergegeven in Tabel 8.

Tabel 8 Onnauwkeurigheid in de gemeten stroom volgens NEN-EN-IEC 61869-3 voor de 150 kV-lijn in Maartensdijk met een nominale stroom (van de stroomtransformator) van 1600 A

% I_n	stroom (A)	stroom secundaire zijde stroomtransformator (A)		presentatie stroom na meetomvormer (A)	
		min	max	min	max
5	80	0,0485	0,0515	74,4	85,6
20	320	0,1970	0,2030	312,0	328,0
100	1600	0,9900	1,0100	1580,8	1619,2
120	1920	1,1880	1,2120	1897,6	1942,4

stroom (A)	% I_n	% stroom secundaire zijde stroomtransformator		% stroom na meetomvormer	
		min	max	min	max
80	5	4,85	5,15	4,65	5,35
320	20	19,70	20,30	312,00	20,30
1600	100	99,00	101,00	98,80	101,20
1920	120	118,80	121,20	118,60	121,40

Voor stroomwaarden beneden 80 A zijn er geen gegevens over de onnauwkeurigheid van de stroomtransformator beschikbaar.

P (in MW) en Q (in MVar) worden door de meetwaardeomvormer berekend uit de na de spannings- en stroomtransformator gemeten spanning en stroom volgens:

$$P = U \times I \times \sqrt{3} \times \cos(\varphi) \quad (\varphi, \text{ fasehoek})$$

$$Q = U \times I \times \sqrt{3} \times \sin(\varphi)$$

De maximale waarden $P+\Delta P$ en $Q+\Delta Q$ die P en Q binnen de meetonnauwkeurigheden kunnen aannemen worden gevonden door in deze formules respectievelijk $(I+\Delta I)$ en $(U+\Delta U)$ (kolom 4 uit respectievelijk Tabel 8 en Tabel 7) in te vullen. De minimale waarden $P-\Delta P$ en $Q-\Delta Q$ door $(I-\Delta I)$ en $(U-\Delta U)$ in te vullen (kolom 3 uit respectievelijk Tabel 8 en Tabel 7). In Tabel 9 zijn enkele voorbeelden van deze minimale en maximale P en Q's opgenomen voor fasehoeken van 45° ($\cos(\phi)=0,707$) en 30° ($\cos(\phi)=0,866$).

Tabel 9 Enkele voorbeelden van maximale en minimale waarden van P en Q (bij U-150 kV), gepresenteerd na de meetomvormer voor twee fasehoeken

stroom (A)	% I_n	fasehoek $\phi=45^\circ$		fasehoek $\phi=30^\circ$			
		$P_{\min} =$ Q_{\min} (MW)	$P_{\max} =$ Q_{\max} (MW)	P_{\min} (MW)	P_{\max} (MW)	Q_{\min} (MW)	Q_{\max} (MW)
80	5	12,1	17,2	15,3	20,7	8,0	12,8
320	20	55,7	61,9	68,7	75,3	38,8	44,4
1600	100	288,3	299,6	353,6	366,4	203,3	212,4
1920	120	346,4	359,0	424,7	439,3	244,3	254,5

De meetwaardeomvormer introduceert een extra onnauwkeurigheid van 2,08 MW (0,5% F_s).

Onnauwkeurigheid in teruggerekende waarden voor I

Omdat de gemeten stroomwaarden niet opgeslagen zijn, moeten deze worden teruggerekend uit de opgeslagen waarden voor P, Q en U. Dit betekent dat de onnauwkeurigheid in de teruggerekende stroom niet alleen afhangt van de onnauwkeurigheid in de stroommeting zelf, maar ook van de onnauwkeurigheid in de gemeten waarde voor U en de berekende waarden voor P en Q. De maximale waarde $I+\Delta I$ die de teruggerekende stroom I in formule (1) kan aannemen volgt dan weer door $P+\Delta P$, $Q+\Delta Q$ en $U-\Delta U$ in de formule in te vullen. De minimale waarde $I-\Delta I$ door $P-\Delta P$, $Q-\Delta Q$ en $U+\Delta U$ in te vullen.

Voor Maartensdijk is deze 'terugrekening' uitgevoerd voor verschillende stroomwaarden, uitgaande van een spanning van $150 \pm 0,6$ kV (zie Tabel 7), en een fasehoek van 45° . Deze fasehoek is gekozen omdat voor die hoek P en Q gelijk zijn, wat leidt tot de grootste onnauwkeurigheid in de teruggerekende stroom. Zo'n fasehoek treedt in de praktijk niet op. In werkelijkheid ligt $\cos(\phi)$ tussen 0,8 en 0,9. De 'Full Scale' voor P van de meetwaardeomvormer bedraagt 415,7 MW ($150.000 \times 1600 \times \sqrt{3}$). Met een onnauwkeurigheid van 0,5% F_s betekent dit 2,08 MW. De 'Full Scale' voor Q van de meetwaardeomvormer bedraagt 415,7 MVar ($150.000 \times 1600 \times \sqrt{3}$). Met een onnauwkeurigheid van 0,5% F_s betekent dit 2,08 MVar.

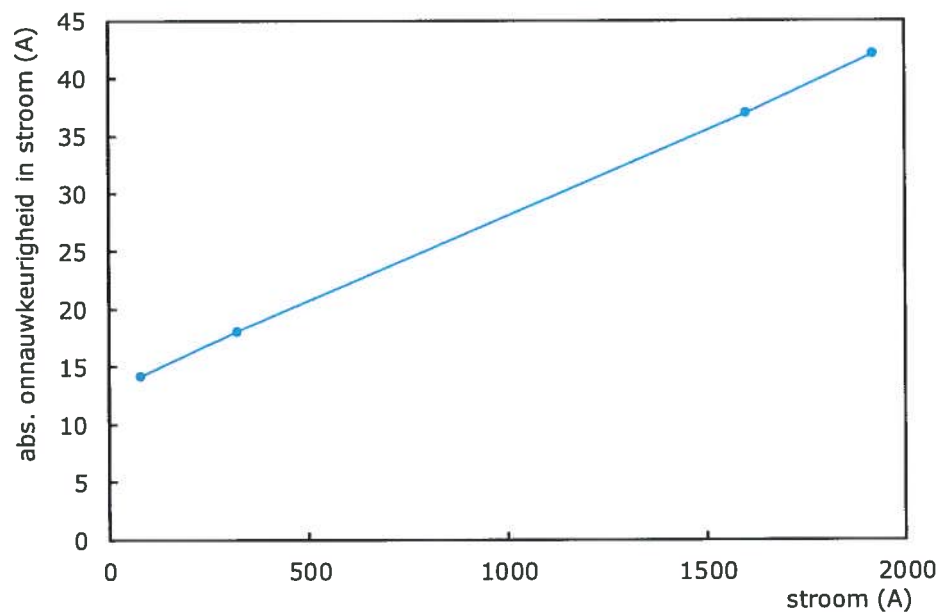
De op deze manier teruggerekende laagste en hoogste schatting voor de stroom, I (minimaal) en I (maximaal), zijn weergegeven in Tabel 10. ΔI (absoluut) is bepaald uit:

$$\Delta I = (I(\text{maximaal}) - I(\text{minimaal}))/2$$

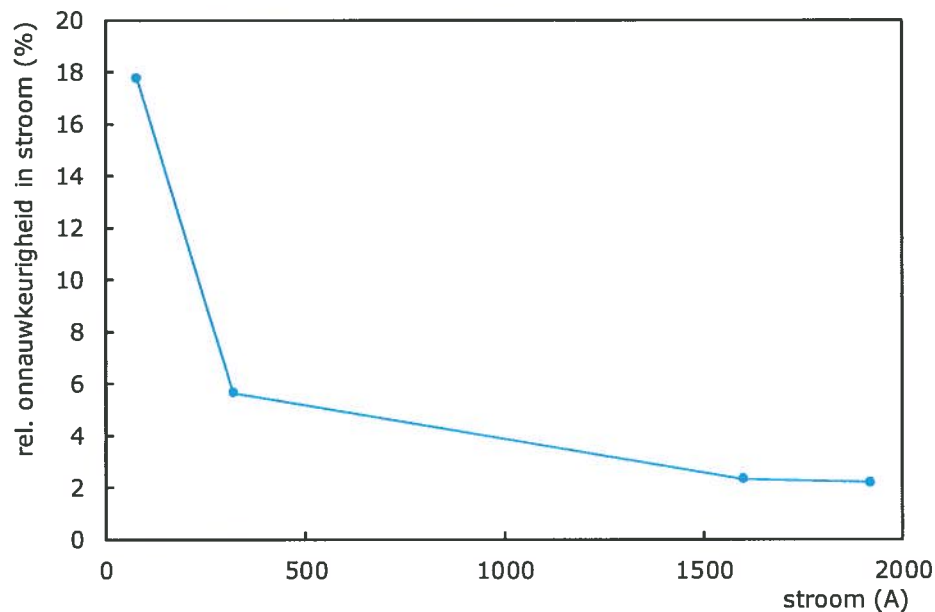
Tabel 10 Laagste en hoogste schatting voor de (teruggerekende) stroom en de uit het verschil voortvloeiende meeton nauwkeurigheden

stroom (A)	I (minimaal)	I (maximaal)	ΔI (absoluut)	ΔI (procentueel)
80	65,9	94,3	14,2	17,7
320	302,0	338,1	18,0	5,6
1600	1563,3	1637,1	36,9	2,3
1920	1878,2	1962,2	42,0	2,2

De onnauwkeurigheid in de circuitstroom is weergegeven in Figuur 16 (absolute onnauwkeurigheid) en in Figuur 17 (relatieve onnauwkeurigheid).



Figuur 16 Weergave van de absolute meeton nauwkeurigheid in de circuitstroom van de 150 kV-lijn in Maartensdijk voor 5, 20, 100 en 120% van de nominale stroomsterkte door de stroomtransformator (1600 A)



Figuur 17 Weergave van de relatieve meetonnauwkeurigheid in de circuitstroom van de 150 kV-lijn in Maartensdijk voor 5, 20, 100 en 120% van de nominale stroom (1600 A)

In Maartensdijk zijn de gemeten en berekende magneetvelden vergeleken over een periode van zes uur op 18 september 2012. In deze periode was de stroomsterkte altijd groter dan 80 A. De gemiddelde stroomsterkte in deze periode was 113,6 A. Door interpolatie van de gegevens in Tabel 10 is de bijbehorende ΔI (absoluut) 14,7 A en de ΔI (procentueel) 13,0%.

Wanneer de stroom gelijk is aan 483 A (50% van de ontwerpstroom van de lijn), dan is de bijbehorende ΔI (absoluut) 20,4 A en de ΔI (procentueel) 4,2%.

Bovenstaande waarden voor ΔI zijn weergegeven als standaardonzekerheid. Voor het bepalen van een 95%-betrouwbaarheidsinterval in de stroomwaarden wordt uitgegaan van ± 2 x standaardonzekerheid. Dit betekent voor de 95%-betrouwbaarheidsintervallen:

- bij de zesuurgemiddelde stroom: $113,6 \pm 29,4$ A ($\pm 26,0\%$)
- bij 50% van de ontwerpstroom: $483 \pm 40,8$ A ($\pm 8,4\%$).

Bijlage 4 Bepaling van theoretisch onzekerheidsbudget

Verschil tussen onzekerheden en systematische fouten

Zowel bij het uitvoeren van magneetveldmetingen als magneetveldberekeningen (berekening met een rekenmodel op basis van stroommetingen) is er sprake van onzekerheden, die de resultaten kunnen beïnvloeden. Deze onzekerheden zijn afkomstig uit verschillende bronnen/invloedsfactoren, zoals de onnauwkeurigheid van meetapparatuur, afwijkingen in afstand door weersomstandigheden of vereenvoudigingen in een rekenmodel. De grootte van deze onzekerheden kunnen worden bepaald of geschat, maar niet worden gereduceerd (tenzij er bijvoorbeeld wordt gekozen voor alternatieve meetapparatuur of rekenmodellen).

Onzekerheden zijn niet hetzelfde als systematische fouten. Systematische fouten in het in dit rapport beschreven onderzoek zijn bijvoorbeeld afwijkingen in de exacte locatie van een meetpaal ten opzichte van de hartlijn, verschillen in de tijdsregistraties van de gebruikte meters of structurele asymmetrie (onbalans) in de stroombelasting van de twee circuits. Bij het vergelijken van gemeten en gemodelleerde magneetvelden vindt zo veel mogelijk interne controle plaats om deze systematische fouten te elimineren (zie ook Bijlage 5).

Wat is het theoretisch onzekerheidsbudget?

Het theoretisch onzekerheidsbudget van de metingen en berekeningen geeft de theoretische afwijking aan die de onzekerheden in de invloedsfactoren gezamenlijk kunnen veroorzaken.

Voor elk van de invloedsfactoren kan een standaardonzekerheid worden bepaald of geschat. Deze standaardonzekerheden worden voor alle invloedsfactoren in één tabel samengevat, waarna een gecumuleerde standaardonzekerheid van de magneetveldmetingen of de stroommetingen kan worden bepaald. Op deze manier wordt een standaardonzekerheidsinterval bepaald: gemiddelde waarde \pm gecumuleerde standaardonzekerheid in de betreffende meting. Bij herhaling van de metingen onder gelijke omstandigheden is er op basis van deze theoretische schatting 68% kans dat het resultaat valt binnen dit standaardonzekerheidsinterval (uitgaande van een normaalverdeling).

De gecumuleerde standaardonzekerheden van de magneetveldmetingen respectievelijk de stroommetingen worden vervolgens gecombineerd in een theoretisch onzekerheidsbudget, waarin eveneens de onzekerheden in het gebruik van een rekenmodel zijn verwerkt (bij het berekenen van de magneetvelden). Dit theoretisch onzekerheidsbudget geeft aan wat de theoretische uitgebreide onzekerheid is, waarbij de uitgebreide onzekerheid twee keer zo groot is als de standaardonzekerheid (uitgaande van een normaalverdeling). De theoretische uitgebreide onzekerheid geeft de grenzen aan van het theoretische 95%-betrouwbaarheidsinterval van de vergelijking van gemeten en berekende magneetvelden. In de hoofdtekst van dit rapport wordt hiernaar verwezen als de 'theoretische onzekerheidsmarge'.

Het bepalen van een theoretisch onzekerheidsbudget is conservatief van aard: door het incalculeren van theoretische onzekerheden geeft de uitkomst een worst-case-waarde voor de onzekerheid aan. In de praktijk zullen de

onzekerheden in de meeste gevallen kleiner zijn dan de theoretische waarde (zie Bijlage 5).

Theoretisch onzekerheidsbudget tijdens metingen

Om het theoretisch onzekerheidsbudget te kunnen bepalen moet de gezamenlijke standaardonzekerheid worden bepaald in drie stappen:

- standaardonzekerheid in de magneetveldmetingen;
- standaardonzekerheid in de stroommetingen;
- standaardonzekerheid in de combinatie van metingen en modelberekening.

In de gezamenlijke standaardonzekerheid (u) zijn de standaardonzekerheden van alle factoren die invloed kunnen hebben op het eindresultaat (u_p) gecombineerd volgens:

$$u = \sqrt{\sum_p u_p^2} = \sqrt{\sum_p \left(\frac{U_p}{k_p}\right)^2}$$

Hierbij is:

- p Index voor de invloedsfactor
- u Gezamenlijke standaardonzekerheid
- u_p Standaardonzekerheid voor elke invloedsfactor p
- U_p Gespecificeerde/geschatte onzekerheidsbijdrage van de invloedsfactor p
- k_p Divisor voor de invloedsfactor p voor correctie standaardonzekerheid

De grootte van de divisor k_p is afhankelijk van de herkomst van de gegevens. Een kalibratiecertificaat gaat meestal uit van een normaalverdeling; in dat geval geldt $k_p=2$. Een datasheet met specificaties van een apparaat gaat meestal uit van een rechthoekige verdeling; in dat geval geldt $k_p=\sqrt{3}$. Is de onzekerheidsbijdrage al weergegeven als een standaardonzekerheid (bijvoorbeeld in het geval van spreiding van meetresultaten), dan is $k_p=1$.

Onzekerheidsanalyse magneetveldmetingen

Mogelijke afwijkingen in de gemeten magneetvelden ten opzichte van de daadwerkelijke veldsterkte op het beoogde moment en op de beoogde locatie kunnen worden veroorzaakt door:

- de meeton nauwkeurigheid van de magneetveldmeters (inclusief het breedbandig in plaats van frequentiespecifiek bij 50 Hz meten);
- temperatuurafhankelijkheid van de magneetveldmeters;
- afwijkingen in de hoogte van de geleiders ten opzichte van het maaiveld (uitgangspunten voor de hoogte: opgave van TenneT). De hoogte van de geleiders wordt tijdens metingen bijvoorbeeld beïnvloed door uitzwaaiing door wind. De geleiderhoogte is weergegeven bij een geleidertemperatuur van 15°C. De geleidertemperatuur wordt beïnvloed door de omgevingstemperatuur en door de stroombelasting van de geleiders (hoe meer stroom, des te warmer de geleider, waardoor de geleider uitzet en meer gaat doorhangen);
- de nabijheid van andere bronnen van de elektriciteitsvoorziening. Deze andere bronnen kunnen bijdragen aan de gemeten veldsterkte.

De meeton nauwkeurigheid van de magneetveldmeters is volgens de specificaties ± 2 tot 4% (rechthoekverdeling, dus $k_p=\sqrt{3}$). Vanwege de relatief lage veldsterkten ten opzichte van het meetbereik en de breedbandige meetmethode

(niet frequentiespecifiek bij 50 Hz) is bij deze validatie uitgegaan van de maximale $\pm 4\%$ onnauwkeurigheid bij de gespecificeerde temperatuur. De meetonnauwkeurigheid van de EMDEX-meters is gespecificeerd bij een temperatuur van 27°C. Voor elke 10° afwijking dient er 3% extra onnauwkeurigheid te worden meegenomen. De temperatuur tijdens de metingen was circa 15°C, dus werd hier uitgegaan van 3% extra onnauwkeurigheid.

Voor de afwijking in de hoogte van de geleiders ten opzichte van het maaiveld is een onzekerheidsbijdrage van 4% gekozen. Deze 4% afwijking betekent bijvoorbeeld dat de geleiders 0,75 m lager of hoger hangen dan volgens de opgave van TenneT, uitgaande van de positie direct onder de geleiders waar de invloed van deze afwijking het grootst is.

De metingen in Maartensdijk zijn uitgevoerd in een weiland waar geen andere bronnen van 50 Hz-velden aanwezig zijn. In dit geval is de onzekerheidsbijdrage van de nabijheid van andere bronnen dan ook nihil.

De theoretische onzekerheidstabel voor de magneetveldmetingen in Maartensdijk is hiermee als weergegeven in Tabel 11.

Tabel 11 Theoretische onzekerheidstabel magneetveldmetingen in Maartensdijk

invloedsfactor p	bijdrage U_p	herkomst	divisor k_p	standaard onzekerheid u_p
onnauwkeurigheid meter	0,040	specificatie	1,73	0,023
temp. afhankelijkheid meter (3% per 10°C)	0,030	specificatie	1,73	0,017
afwijking hoogte geleiders (weer/wind)	0,040	schatting	1	0,040
nabijheid andere bronnen	0		1	0
gecombineerde standaardonzekerheid magneetveldmetingen u_B				0,049 (4,9%)

Onzekerheidsanalyse stroommetingen

De theoretische onzekerheidsbijdrage van de onnauwkeurigheid van de stroommetingen in station Soest tijdens de onderzochte meetperiode op 18 september 2012 tussen 11:00 uur en 17:00 uur is bepaald op 13,0% (zie Bijlage 3). Omdat hierin de onzekerheidsbijdragen van de stroomtransformator, de spanningstransformator en de bewerkingsstappen in de meetomvormer zijn inbegrepen, wordt voor de divisor k_p de worst-case-waarde van 1 gekozen.

De berekening van de magneetvelden is uitgevoerd op basis van de gemiddelde stroom van de twee circuits. Er wordt geen rekening gehouden met onbalans in de stromen. Tijdens de metingen was de gemiddelde onbalans kleiner dan 1%. Als onzekerheidsbijdrage voor de onbalans is 1% gekozen.

De theoretische onzekerheidstabel voor de stroommetingen in station Soest is hiermee als weergegeven in Tabel 12 (bij $I_{gem} = 113,6$ A).

Tabel 12 Theoretische onzekerheidstabel stroommetingen station Soest

invloedsfactor p	bijdrage U_p	herkomst	divisor k_p	standaard onzekerheid u_p
onnauwkeurigheid stroommetingen	0,130	schatting	1	0,130
correctie onbalans/tijdsmiddeling e.d.	0,010	schatting	1	0,010
gecombineerde standaardonzekerheid stroommetingen u_t				0,130 (13,0%)
doorberekenen standaardonzekerheid stroommeting naar veldsterkten, u_t^*				0,130 (13,0%)

Onzekerheidstabel combinatie magneetveldmetingen en modelberekeningen

In dit onderzoek worden gemeten en gemodelleerde magneetvelden met elkaar vergeleken. De gemodelleerde magneetvelden worden berekend op basis van de gemeten stroomwaarden, zodat de standaardonzekerheid in de stroommetingen wordt doorberekend in het gemodelleerde magneetveld. Om het magneetveld te kunnen berekenen wordt een rekenmodel gebruikt, dat getoetst is aan de rekenmethode volgens de Handreiking voor het berekenen van de specifieke magneetveldzone (waarin niet de 'vaste' stroomsterkte van 50% van de ontwerpbelasting wordt ingevoerd, maar de actuele gemeten stroom in station Soest).

Omdat er bij een berekening altijd sprake is van vereenvoudigingen, wordt bij het berekenen van de gecombineerde standaardonzekerheid van de validatie rekening gehouden met een extra standaardonzekerheid door toepassing van het model van 3% [5].

In de gecombineerde theoretische standaardonzekerheid van de validatie, u_v , zijn de standaardonzekerheden van de magneetveldmetingen, de stroommetingen en de modelberekeningen samengevoegd, zie Tabel 13.

Tabel 13 Theoretisch onzekerheidsbudget validatie Maartensdijk, tijdens validatie

invloedsfactor p	standaard onzekerheid u_p
magneetveldmetingen u_b	0,049
stroommetingen u_t^*	0,130
modelcorrectie (conform [5]: 3%)	0,030
gecombineerde standaardonzekerheid validatie u_v	0,143 (14,3%)
theoretische uitgebreide onzekerheid validatie $U_v (=2xu_v)$	0,285 (28,5%)

De theoretische uitgebreide onzekerheid van de validatie geeft de grenzen aan van het theoretische 95%-betrouwbaarheidsinterval van gemeten en gemodelleerde magneetvelden. Dit betekent dat wanneer er bij gelijke omstandigheden nieuwe metingen en modelberekeningen worden gedaan, er op basis van een theoretische worst-case-beschouwing 95% zekerheid is dat het daadwerkelijke magneetveld maximaal 28,5% afwijkt van het gemiddelde van het gemeten en het gemodelleerde magneetveld.

Theoretisch onzekerheidsbudget bij 50% van de ontwerpstroom

Tijdens de metingen in Maartensdijk was de actuele stroom lager dan de stroom die wordt gebruikt bij het berekenen van de specifieke magneetveldzone. Bij een hogere stroom neemt de onnauwkeurigheid in de stroommeting af: de standaardonzekerheid daalt van 13,0% bij 113,6 A (gemiddelde stroom tijdens de metingen) naar 4,2% bij 483 A (50% van de ontwerpstroom). Hierdoor neemt de gecombineerde standaardonzekerheid van de stroommetingen eveneens af. Aangenomen wordt dat de onnauwkeurigheid in de magneetveldmetingen gelijk is aan de situatie bij 113,6 A (i.e. uitgaande van identieke weersomstandigheden). De onzekerheidstabel van de stroommeting (bij $I=483$ A) is dan als weergegeven in Tabel 14.

Tabel 14 Theoretische onzekerheidstabel stroommetingen station Soest bij 50% van ontwerpstroom (483 A)

invloedsfactor p	bijdrage U_p	herkomst	divisor k_p	standaard onzekerheid u_p
onnauwkeurigheid stroommetingen	0,042	schatting	1	0,042
correctie onbalans/tijdsmiddeling e.d.	0,01	BAFU	1	0,010
gecombineerde standaardonzekerheid stroommetingen u_1				0,043 (4,3%)
doorberekenen standaardonzekerheid stroommeting naar veldsterkten u_1^*				0,043 (4,3%)

In de gecombineerde theoretische standaardonzekerheid van de validatie, u_v , zijn de standaardonzekerheden van de magneetveldmetingen, de stroommetingen en de modelberekeningen samengevoegd, zie Tabel 15.

Tabel 15 Theoretisch onzekerheidsbudget validatie Maartensdijk, bij 50% van ontwerpbelasting (483 A)

invloedsfactor p	standaard onzekerheid u_p
magneetveldmetingen u_b	0,049
stroommetingen u_1^*	0,043
modelcorrectie (conform [5]: 3%)	0,030
gecombineerde standaardonzekerheid validatie u_v	0,072 (7,2%)
theoretische uitgebreide onzekerheid validatie $U_v (=2xu_v)$	0,144 (14,4%)

Wanneer de metingen en modelberekeningen zouden worden uitgevoerd bij 50% van de ontwerpstroom, dan is het theoretische onzekerheidsbudget van de validatie kleiner dan bij de in september 2012 uitgevoerde validatie: 14,4% in plaats van 28,5%.

Bijlage 5 Bepaling van de onzekerheid in de resultaten van metingen en modelberekeningen in Maartensdijk

Inleiding

In Bijlage 4 zijn de theoretische onzekerheidsbudgetten bepaald voor het vergelijken van metingen en modelberekeningen, zowel bij de actuele stroom tijdens de metingen als bij de rekenstroom conform de Handreiking. Het theoretische onzekerheidsbudget is bepaald op basis van worst-case-schattingen van de onzekerheden.

Een doel van het uitgevoerde validatieonderzoek is het vergelijken van gemeten en gemodelleerde veldsterkten in een praktijksituatie. Uit de verschillen tussen gemeten en gemodelleerde magneetvelden kan het gemiddelde relatieve verschil worden bepaald, samen met de standaard error. Als het gemiddelde relatieve verschil ± 2 x standaard error kleiner is dan het theoretische onzekerheidsbudget, dan mag men aannemen dat de metingen/modelberekeningen op correcte wijze zijn uitgevoerd. In dat geval mag bij gelijke omstandigheden het gemiddelde relatieve verschil ± 2 x standaard error als 95%-onzekerheidsmarge voor deze situatie worden gehanteerd.

Verwijderen van systematische fouten

Om de gemeten en gemodelleerde magneetvelden te kunnen vergelijken, dienen zo veel mogelijk de systematische fouten te worden geminimaliseerd. Hieronder wordt een overzicht gegeven van de interne controle voor het verwijderen van systematische fouten die in het kader van de validatie is toegepast.

Beperking van fouten in stroommeting

Beneden een bepaalde stroomwaarde is de onnauwkeurigheid van de stroomtransformator niet gespecificeerd (maar is naar verwachting groter dan bij hogere stroomwaarden). Hoe hoog deze drempelwaarde is wordt bepaald door de nauwkeurigheidsklasse en de overzetverhouding van de stroomtransformator. Bovendien is bij lage stroom de laadstroom van de verbinding een onbekende complicerende factor. Door in de validatie uitsluitend een aaneengesloten tijdsperiode te beschouwen waarin de stroom hoger is dan de drempelwaarde, kan zowel een theoretische onnauwkeurigheid worden bepaald als de invloed van de laadstroom van de verbinding worden beperkt. Voor de stroommetingen in station Soest geldt een drempelwaarde van 80 A (zie Bijlage 3). Voor de validatie is uitgegaan van een aaneengesloten meetinterval op 18 september 2012 tussen 11:00 uur en 17:00 uur; in deze periode was de stroom hoger dan 80 A.

Onbalans (asymmetrie) in stromen

De stromen in de twee circuits kunnen in de praktijk van elkaar verschillen, terwijl in het berekeningsmodel wordt uitgegaan van gelijke stroom. Door asymmetrie kunnen vooral de magneetvelden op locaties dicht bij de hartlijn worden beïnvloed; op grotere afstand (zoals ter hoogte van de specifieke magneetveldzonegrens) neemt deze invloed af. Tijdens de metingen in Maartensdijk geldt dat de asymmetrie tussen de twee circuits kleiner was dan 1%. In de validatie is daarom uitgegaan van de gemiddelde stroom tussen de twee circuits en is er niet gecorrigeerd voor asymmetrie. Is er bij een eventuele toekomstige validatie sprake van sterkere asymmetrie, dan kan dit in het berekeningsmodel worden verwerkt.

Synchronisatie tijdsmarkering magneetveldmeters onderling

Elke veldsterktemeter heeft zijn eigen tijdsregistratie, die wordt bepaald door het starttijdstip van de betreffende meter en het moment van uitlezen van de resultaten. Elke meter meet vanaf het starttijdstip om de vier seconden. Omdat de starttijdstippen en de uitleestijdstippen van de meters niet gelijk zijn, moeten de gemeten magneetveldcurves ten opzichte van elkaar worden verschoven in de tijd totdat ze zo goed mogelijk samenvallen.

Voor de metingen in Maartensdijk is dit gedaan door uit te gaan van de magneetveldmeter die op de hartlijn was geplaatst (meter nummer 10). Vervolgens zijn de tijdreeksen van de andere magneetveldmeters met stapjes van vier seconden verschoven totdat het patroon van alle veldsterkte-tijd-curves zo optimaal mogelijk samenviel.

Synchronisatie tijdsmarkering stroommetingen en magneetveldmetingen

Ook de stroommetingen in het station zijn verbonden aan een (vaste) tijdsregistratie, waarbij elke vijf minuten één waarde voor de stroom voor elk circuit uit de door TenneT aangeleverde data is te berekenen. Deze tijdsregistratie moet zo goed mogelijk samenvallen met die van de magneetveldmeters. Deze crosscorrelatie is uitgevoerd door de stroom-tijd-curve en de magneetveld-tijd-curve van de magneetveldmeter op de hartlijn met stapjes van vier seconden ten opzichte van elkaar te verschuiven totdat de patronen zo optimaal mogelijk samenvielen.

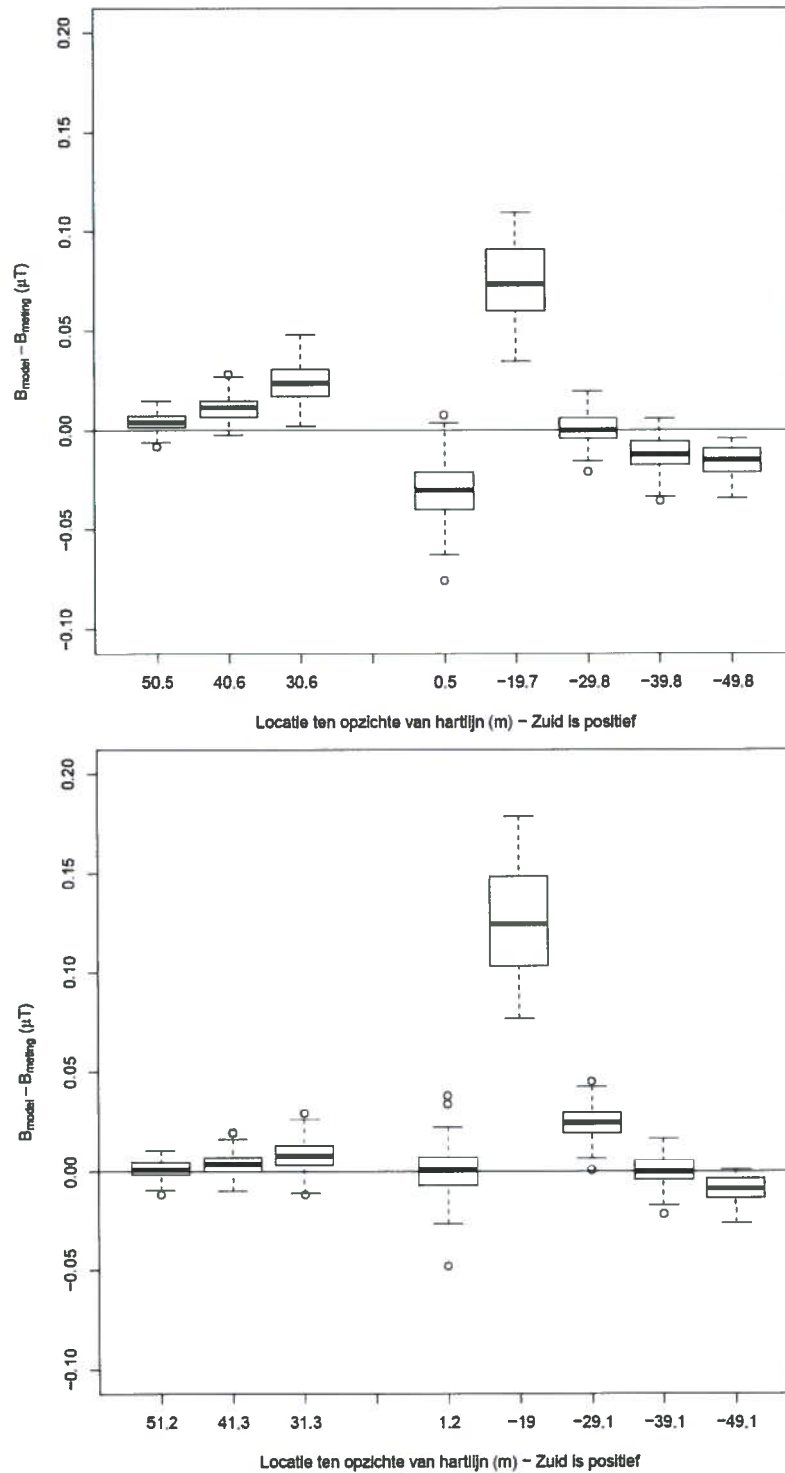
Bij de metingen in Maartensdijk bleek hierbij de tijdsregistratie van de stroommetingen ruim viereneenhalve minuut af te wijken van de tijdsregistratie van de magneetveldmeter op de hartlijn.

Locatie magneetveldmeters ten opzichte van de hartlijn

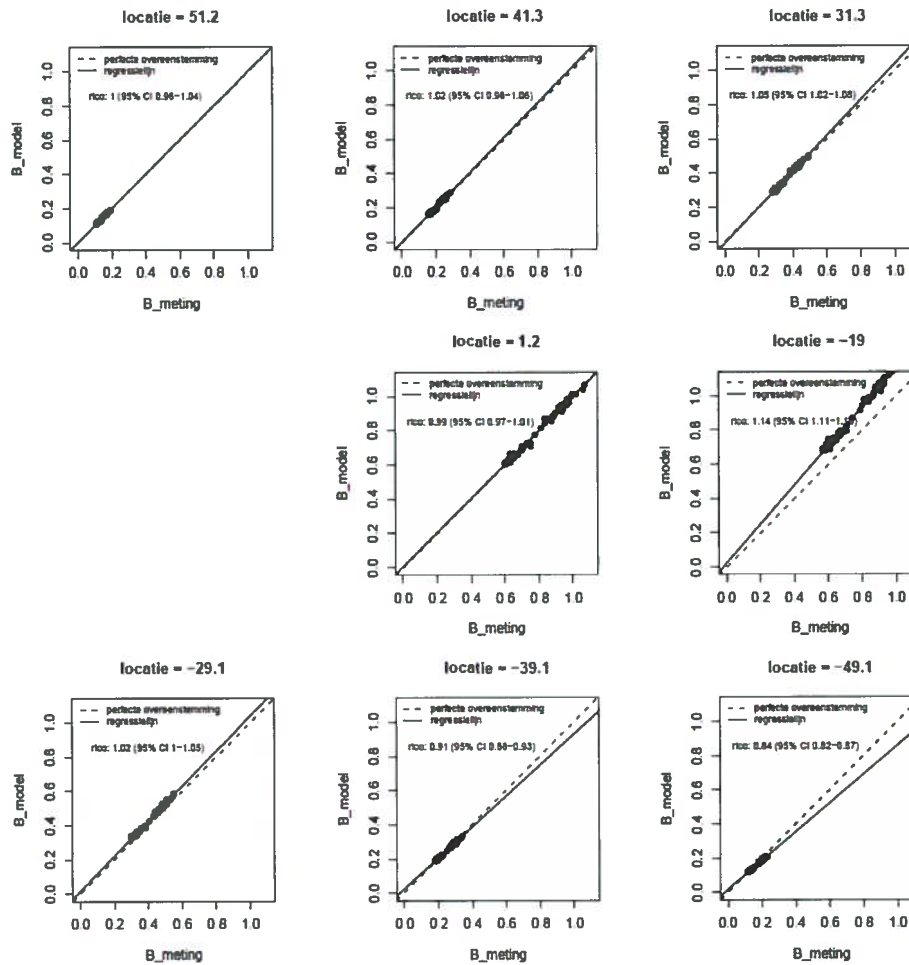
De afstanden tussen de magneetveldmeters onderling werden exact bepaald met behulp van een laserafstandmeter, zodat de onnauwkeurigheid hiervan verwaarloosbaar klein is. Het referentiepunt is echter de meter op de hartlijn; een onnauwkeurigheid in de bepaling van deze locatie veroorzaakt een systematische fout in de berekening en werkt door in de berekende magneetvelden op alle locaties. Tijdens de metingen werd een controle uitgevoerd, waaruit bleek dat de centrale meter op 0,5 m ten zuiden van de hartlijn stond. Alle meetlocaties van de andere meters werden daarop aangepast.

Tijdens de analyse bleek dat de overeenkomst tussen de gemeten en de gemodelleerde magneetvelden verbeterde wanneer de locaties van alle meters nog 70 cm extra zuidwaarts werden verschoven. Hierbij zou de centrale meter op 1,2 m ten zuiden van de hartlijn komen te staan.

Om het effect van deze verschuiving zichtbaar te maken worden in Figuur 18 boxplots weergegeven van de niet-verschoven locaties (i.e. met de centrale meetpaal op 50 cm ten zuiden van de hartlijn, de werkelijke posities in Tabel 1) en voor 70 cm 'extra' verschuiving zuidwaarts (i.e. met de centrale meetpaal op 1,2 m ten zuiden van de hartlijn). Bij de 70 cm extra verschuiving ligt het gemiddelde absolute verschil tussen het berekende en gemeten magneetveld bij de zes meters op enige afstand vanaf de hartlijn dichter bij de nullijn (= geen verschil) dan bij de niet-verschoven locaties.



Figuur 18 Het verschil tussen berekende en gemeten magneetvelden zonder (boven) en met (beneden) een extra verschuiving van de meetlocaties van 70 cm naar het zuiden



Figuur 19 Vergelijking van de gemeten en de berekende magneetvelden voor de acht meetlocaties met een extra verschuiving van de meetlocaties van 70 cm naar het zuiden

Voor de 'extra verschoven' meetposities (met de centrale meetpaal op 1,2 m ten zuiden van de hartlijn) zijn in Figuur 19 concordance plots weergegeven. Uit deze figuur blijkt dat op de meeste locaties de gemeten en berekende magneetvelden goed overeenkomen: de resultaten liggen dicht bij de ideale lijn, weergegeven door de stippellijn.

Uitzonderingen zijn de meters aan de noordzijde op -19,0 m (model > meting) en -49,1 m (meting > model). Voor de positie op -19,0 m kan dit twee oorzaken hebben:

- het rekenmodel gaat uit van een lineaire relatie tussen stroom en magneetveld, wat dicht bij de lijn waarschijnlijk niet realistisch is;
- hoe dichter de locatie bij de geleiders is, des te groter is de invloed van een kleine afwijking in de locatiebepaling.

Voor de positie op -49,1 m is niet duidelijk waarom het gemeten magneetveld structureel hoger is dan het berekende magneetveld. Mogelijk is hier sprake van een systematische fout die niet is onderkend, bijvoorbeeld bij het uitvoeren van de laserafstandsmeting om deze locatie te bepalen.

Omdat deze extra verschuiving van 70 cm niet direct uit de metingen volgde, maar uit de analyse, is ervoor gekozen om in dit rapport uit te gaan van de originele meetlocaties met de centrale meetpaal op 50 cm ten zuiden van de hartlijn. Deze analyse geeft echter wel aan hoe belangrijk een exacte plaatsbepaling bij metingen is.

Locatie magneetveldmeters ten opzichte van de lijn die loodrecht op de hartlijn staat

Bij het plaatsen van de meters is het mogelijk dat de locaties niet exact op de lijn liggen die loodrecht op de hartlijn staat. Elke afwijking van deze lijn betekent dat de exacte positie van de meter in werkelijkheid dicht bij de lijn ligt dan de beoogde situatie, zodat het gemodelleerde magneetveld te laag is.

Bij de metingen in Maartensdijk bleek dat de meetlocaties aan de noordzijde van de lijn 3 tot 6 graden afweken van de loodrechte lijn. Bij de analyse zijn de daadwerkelijke loodrechte afstanden tot de hartlijn bepaald en gehanteerd.

Resterende systematische fouten

Na het minimaliseren van bovengenoemde systematische fouten, is het mogelijk dat er nog systematische fouten optreden die in de interne controle niet (of niet eenvoudig) geminimaliseerd kunnen worden, of systematische fouten waarvan aannemelijk is dat ze verwaarloosbaar zijn:

- Afwijkingen in de stroom in het vaksegment ten opzichte van de stroommetingen in station Soest (o.a. door laadstroom en fasenhoekverschuiving). Hiervoor kan alleen worden gecorrigeerd wanneer de gehele hoogspanningsverbinding in een exact rekenmodel wordt gemodelleerd, zonder de aannames en vereenvoudigingen die in het kader van de Handreiking worden toegepast.
- Afwijkingen in hoogte van de geleiders ten opzichte van het maaiveld. Dit heeft een directe invloed op de afstand tussen de geleiders en de meter, en dus op het gemeten magneetveld. Deze invloed is dicht bij de geleiders groter dan op grotere afstand. In de modelberekeningen worden de hoogten van de geleiders zoals door TenneT is opgegeven gebruikt (ontwerpgegevens bij een geleidertemperatuur van 15°C). In een exact rekenmodel kunnen de exacte hoogten bij elke stroom en elke omgevingstemperatuur worden berekend, mits de uitgangsgegevens juist zijn.
- Afwijkingen van de lineaire relatie tussen stroom en magneetveld. Het rekenmodel op basis van EFC400 gaat uit van een lineaire relatie tussen stroom en magneetveld. Strikt genomen is deze relatie alleen lineair op enige afstand van de hartlijn, wanneer de geleiders als één gezamenlijke bron kunnen worden beschouwd. Dicht bij de hartlijn zijn de verschillen in fysieke afstanden van elke individuele geleider tot de beoogde locatie groter, zodat de invloed van de individuele geleiders op het totale gezamenlijke magneetveld verschillend is. Dicht bij de hartlijn is het magneetveldverloop als functie van de stroom dan ook niet lineair. Hoe groot deze afwijking is, is sterk afhankelijk van de situatie; desgewenst kan dit worden bepaald door het EFC400-rekenmodel te vergelijken met een meer exact rekenmodel voor verschillende configuraties.
 - NB. De Handreikingsmodellen worden gebruikt om te berekenen waar het magneetveld 0,4 microtesla is, i.e. op relatief grote afstand van de hartlijn; op deze afstand is de afwijking van de lineaire relatie klein.
- De invloed van aannames en vereenvoudigingen in het rekenmodel. Voor de onderzochte situatie in Maartensdijk is de invloed van een aantal van deze aannames en vereenvoudigingen in kaart gebracht (zie Bijlage 6); in dit geval bleek de invloed van deze aannames en vereenvoudigingen verwaarloosbaar klein te zijn.

- Hoogteverschillen in het maaiveld. Ook wanneer het maaiveld op het oog vlak is (zoals in Maartensdijk) is het mogelijk dat er geringe hoogteverschillen zijn. Met behulp van het rekenmodel is bepaald dat een afwijking van 1 m hoogte op 50 m afstand van de hoogspanningslijn in Maartensdijk een verschil van 0,001 microtesla in het magneetveld oplevert. Deze fout wordt verwaarloosbaar klein geacht.

Bepaling relatieve verschillen tussen gemeten en gemodelleerde veldsterkten in Maartensdijk

Voor elk van de acht meetlocaties zijn in de analyseperiode tussen 11:00 uur en 17:00 uur 73 meetpunten beschikbaar, waarop zowel de gemeten stroom I_{meting} als het gemeten magneetveld B_{meting} bekend zijn. Na de uitvoering van de interne controle voor de verwijdering van systematische fouten, worden uit de gemeten stroom met behulp van het rekenmodel de berekende magneetvelden B_{model} per locatie x en per tijdstip t berekend volgens:

$$B_{model} = \text{evenredigheidsconstante}_x \times I_{meting}$$

Waarbij evenredigheidsconstante_x de uit het rekenmodel afkomstige berekeningsfactor is voor de betreffende locatie x (zie Tabel 3).

Vervolgens wordt voor elke locatie en voor elk meettijdstip het relatieve verschil tussen gemeten en gemodelleerd magneetveld, $\Delta_{x,t}$ bepaald volgens:

$$\Delta_{x,t} = \frac{B_{model} - B_{meting}}{(B_{model} + B_{meting})/2}$$

Hieruit kan de relatieve bias (gemiddelde relatieve verschil, gemiddelde Delta) worden bepaald tussen de berekende en gemodelleerde magneetvelden op iedere locatie. Ook kan de standaard error, de standaarddeviatie gedeeld door de wortel uit het aantal metingen (73), worden bepaald. Het 95%-betrouwbaarheidsinterval is dan de gemiddelde relatieve bias ± 2 *standaard error. Het werkelijke gemiddelde relatieve verschil tussen gemeten en gemodelleerde magneetvelden ligt met 95% zekerheid tussen de aangegeven grenzen.

In Tabel 16 is voor elke meetlocatie het gemiddelde absolute verschil tussen berekende en gemodelleerde magneetvelden, de relatieve bias (gemiddeld relatieve verschil) en de standaard error weergegeven. In hoofdstuk 3 zijn deze waarden in grafieken weergegeven.

Tabel 16 Gemiddelde absolute verschil en relatieve bias (gemiddeld relatieve verschil) tussen gemeten en gemodelleerd magneetveld (per locatie en per tijdstip)

afstand vanaf hartlijn (m)	$B_{\text{model}} - B_{\text{meting}}$ gemiddeld (μT)	relatieve bias (%)	standaard error (%)
0,5	-0,031	- 4,1	0,2
19,7	0,079	10,2	0,3
29,8	0,004	1,2	0,6
30,6	0,025	6,6	0,3
39,8	-0,010	- 4,1	0,5
40,6	0,012	5,7	0,5
49,8	-0,016	- 9,9	0,4
50,5	0,005	3,9	0,5

Mogelijkheden ter verkleining van onzekerheden

Dit validatieonderzoek heeft inzicht gebracht in de onzekerheden die een rol kunnen spelen bij magneetveldmetingen en magneetveldberekeningen. Deze onzekerheden kunnen worden verkleind door:

- verbetering stroommetingen: gebruik van originele data;
- verbetering stroommetingen: meten bij hogere belasting en betere stroomtransformator;
- verbetering positiebepaling: inzet van een landmeter;
- verbetering magneetveldmeting: gebruik van nauwkeuriger meters;
- verbetering modelberekening: gebruik van een meer exacte berekeningsmethode.

Verbeteren stroommetingen door gebruik van originele data

De onzekerheid in de stroommetingen kan in vergelijkbare situaties worden beperkt door in plaats van de opgeslagen vijfminutenwaarden de originele viersecondenwaarden van de stroommetingen te gebruiken. Deze viersecondenwaarden worden in het station automatisch gemeten en opgeslagen door het EMS-systeem in het bedrijfsvoeringscentrum van TenneT. Na elke vijf minuten wordt uit de laatste stroomwaarde en de laatste spanningswaarde het vermogen en blindvermogen berekend. Vervolgens worden eens per etmaal de opgeslagen vijfminutenwaarden voor de spanning, het vermogen en blindvermogen overgeheveld naar een database; de stroomwaarden worden niet opgeslagen. Omdat de stroomwaarden vervolgens teruggerekend moeten worden uit de waarden voor de spanning, het vermogen en het blindvermogen, spelen de onzekerheden in deze waarden eveneens een rol. Deze onzekerheden kunnen worden verkleind door de originele viersecondenwaarden voor de stroommetingen uit het EMS-systeem te gebruiken, mits TenneT deze kan aanleveren. Dit zou als bijkomend voordeel hebben dat er dan 75 keer zoveel stroommetingen beschikbaar zijn voor de analyse.

Verbeteren stroommetingen door meten bij hogere belasting en toepassen van betere transformatoren

De stroom door de hoogspanningslijn in Maartensdijk tijdens de meetdag was laag in vergelijking met de stroom waarop de berekening van de specifieke magneetveldzone is gebaseerd (50%): gemiddeld 6% van de ontwerpstroom. De onnauwkeurigheid van de in het station Soest geïnstalleerde stroommeter is relatief groot bij dergelijke lage stroomwaarden. De onzekerheid kan worden verkleind door:

- metingen uit te voeren bij een hogere stroomwaarden, zodat de onnauwkeurigheid in de stroom kleiner is;
- gebruik te maken van een stroomtransformator van een andere nauwkeurigheidsklasse (klasse 0,5 zou onder deze omstandigheden de onnauwkeurigheid van de stroomtransformator halveren tot 1,5%, terwijl klasse 0,2 de onnauwkeurigheid zou reduceren tot 0,75%).

Overwogen kan worden om een vergelijkbaar onderzoek uit te voeren bij een hoogspanningslijn waarvan bekend is dat deze relatief zwaar wordt belast, bij voorkeur tegen de 50% (110 kV of 150 kV) of 30% (220 kV of 380 kV) van de ontwerpstroom. In die gevallen benadert de praktijksituatie de uitgangspunten van de berekening van de specifieke magneetveldzone.

Verbetering positiebepaling door inzet van een landmeter

De afstand van de meetlocatie tot de hartlijn tussen de masten is in dit onderzoek bepaald door het uitvoeren van laserafstandsmetingen ten opzichte van een referentiepunt, namelijk de meetlocatie ter hoogte van de (visueel bepaalde) hartlijn. Een afwijking in de positie van het referentiepunt en afwijkingen ten opzichte van de loodrechte haakse lijn vanaf het referentiepunt veroorzaken onzekerheid in de afstand. In dit onderzoek is getracht de exacte locatie van de meters te bepalen met behulp van GPS-meters, maar deze bleken onvoldoende nauwkeurig te zijn. Het gebruik van nauwkeuriger GPS-meters of inzet van een landmeter kan deze onzekerheid reduceren.

Tijdens de metingen in Maartensdijk is er met behulp van de laserafstandmeter een controlemeting uitgevoerd van de afstand tussen de geleiders en het maaiveld. Deze bleek groter te zijn dan de afstand op basis van de door TenneT aangeleverde gegevens. Wat daarvan de reden is, is niet bekend.

Verbetering magneetveldmeting door gebruik van nauwkeuriger meters

De meetonnauwkeurigheid van de in dit onderzoek gebruikte magneetveldmeters bedraagt bij de omgevingstemperatuur tijdens de meting circa 7%. De bijdrage in de standaardonzekerheid van de magneetveldmetingen is hiermee circa 4%. Deze bijdrage kan worden verminderd door magneetveldmeters met een kleinere meetonnauwkeurigheid te gebruiken. Bij het opnieuw gebruiken van de EMDEX Lite-meters kan de onnauwkeurigheid worden beperkt door de meting uit te voeren bij een omgevingstemperatuur die dichtbij 27°C ligt.

Verbetering modelberekening door gebruik van een meer exacte berekeningsmethode

Voor het berekenen van de magneetvelden is in dit validatieonderzoek gebruik gemaakt van een rekenmodel dat wordt gebruikt om specifieke magneetveldzones te berekenen conform de Handreiking. Zowel in de Handreiking als in het rekenmodel is een aantal aannames en vereenvoudigingen opgenomen. De invloed van enkele aannames in de Handreiking is voor de situatie in Maartensdijk nader onderzocht (zie Bijlage 6).

Welke aannames in het rekenmodel liggen besloten is minder eenvoudig te onderzoeken. Uit de resultaten in Maartensdijk volgen echter aanwijzingen dat het model mogelijk minder geschikt is om magneetvelden dicht bij de geleiders te berekenen.

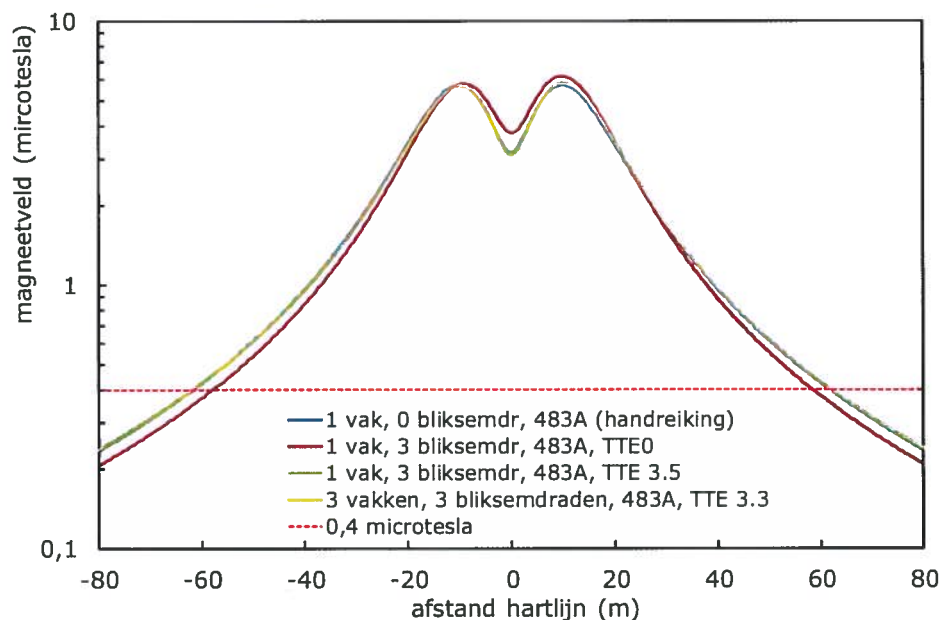
Bijlage 6 Invloed van aannames in de Handreiking op berekende magneetvelden

Bij de toepassing van het rekenmodel conform de Handreiking is gebruik gemaakt van een aantal aannames en vereenvoudigingen. Voorbeelden van deze gehanteerde aannames en vereenvoudigingen zijn:

- van de hoogspanningslijn wordt slechts één vaksegment tussen twee masten in beschouwing genomen;
- andere geleidende materialen spelen geen rol: bliksemraden (als passieve geleiders) worden niet meegenomen in de berekening, mastweerstand en aardverspreidingsweerstand zijn groter dan de weerstand van de geleiders;
- uitzwaaiing van geleiders door wind wordt niet meegenomen.

Voor het in dit rapport beschouwde vaksegment in Maartensdijk is de invloed van enkele van deze aannames op de uiteindelijk berekende zonebreedte onderzocht. In Figuur 20 worden met behulp van EFC 400 berekende magneetveldprofielen weergegeven voor de hoogspanningslijn Utrecht Lage Weide - Soest, voor vier verschillende situaties:

- 1 vaksegment, 0 bliksemraden, stroom 483 A (volgens de Handreiking, zie ook Figuur 9)
- 1 vaksegment, 3 bliksemraden, stroom 483 A, mastweerstand TTE=0 Ω
- 1 vaksegment, 3 bliksemraden, stroom 483 A, mastweerstand TTE=3,5 Ω
- 3 vaksegmenten, 3 bliksemraden, stroom 483 A, mastweerstand TTE=3,3 Ω



Figuur 20 Berekende magneetveldprofielen bij 50% van de ontwerpstroom voor vier verschillende configuraties

Uit Figuur 20 blijkt dat alleen bij drie geleidende bliksemraden en een mastweerstand van 0 Ω het berekende profiel enigszins verandert ten opzichte van de berekening conform de Handreiking: de zonebreedte van dit profiel is 1,5 m smaller. De andere drie berekende profielen zijn vrijwel identiek aan het profiel conform de Handreiking: het verschil in zonebreedte is kleiner dan 0,5 m. Bij een mastweerstand van 0 Ω wordt er door inductie een stroom in de

bliksemdraden opgewekt, die het magneetveld beïnvloedt. Een mastweerstand van 0Ω is echter geen reële waarde. Bij een mastweerstand van enkele Ω is deze stroom al zo zwak dat het effect op het resulterende magneetveld klein is. De verandering in de zonebreedte bij variatie van de mastweerstand tussen $0,25 \Omega$ en 10Ω is kleiner dan $0,5$ m.

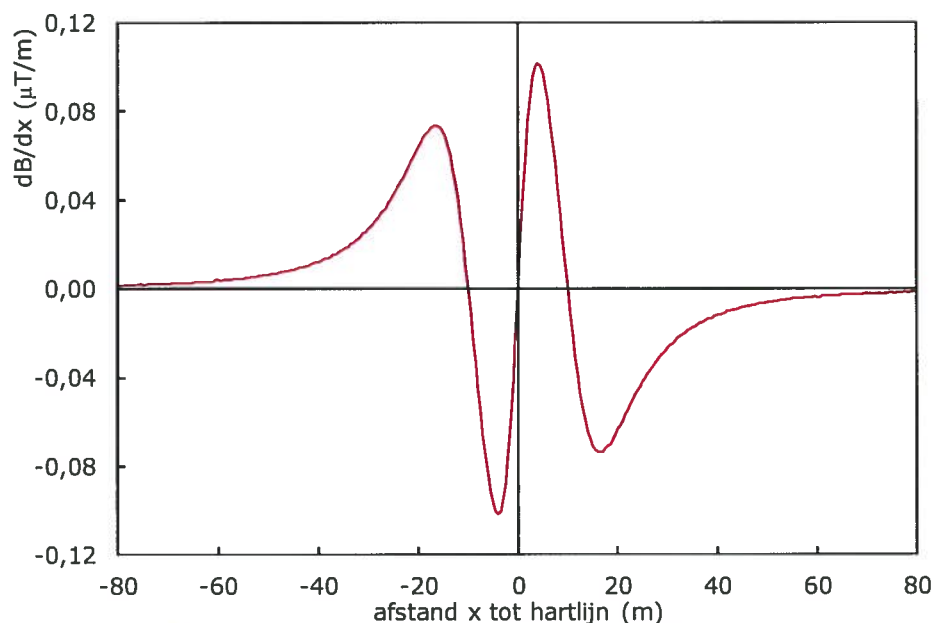
De berekende magneetveldprofielen voor één vaksegment en voor drie vaksegmenten (het te beschouwen vaksegment plus de twee vaksegmenten die hier direct aan grenzen) zijn vrijwel identiek. Overigens geldt dat hoe langer de lijn is, des te meer fasenverschuiving er optreedt (meer laadstroom/blindvermogen), wat een effect kan hebben op het resulterende magneetveld. Bij drie spanvelden is hiervan echter nog geen sprake. Deze fasenverschuiving is niet alleen afhankelijk van de lengte van de verbinding tussen twee stations, maar ook van mogelijke fasenwisselingen in de verbinding of de aanwezigheid van een verkabeld (ondergronds) deel in de verbinding. Deze lijnspecifieke parameters zijn vrijwel niet in een generaliserende modelberekening (zoals in de Handreiking) toe te passen en zijn dan ook niet meegenomen in de berekeningen.

Normaal gesproken hangen geleiders tussen twee masten stil, omdat ze door het grote gewicht niet gemakkelijk uitzwaaien door de wind. Bij harde wind of storm is dit wel mogelijk. Hoe groot dit uitzwaaiingseffect is, is zowel afhankelijk van de lijnparameters (o.a. vaksegmentlengte, type geleiders, doorhang) als van de wind- en weerscondities. Voor de berekening van de specifieke magneetveldzone is dit uitzwaaiingseffect niet van belang, omdat deze zone gebaseerd is op een jaargemiddelde situatie. Gemiddeld over een jaar genomen zal de uitzwaaiing voor vrijwel alle hoogspanningslijnen verwaarloosbaar klein zijn.

Tijdens de metingen op 17 en 18 september 2012 was er sprake van zwakke tot matige wind, 2 tot 3 Bft, met een windrichting tussen zuidwest en west-zuidwest [4]. Visueel is er geen uitzwaaiing van de geleiders geconstateerd. Er is dan ook aangenomen dat er tijdens de metingen geen uitzwaaiing heeft plaatsgevonden.

Bij het uitzwaaien van de geleiders verandert hun positie ten opzichte van de masten: deze is dan verschoven ten opzichte van de hartlijn tussen de twee masten. Dit effect is het grootst op het punt waar de geleiders het laagst hangen, midden tussen de twee masten. Om een indruk te krijgen van het mogelijke effect van uitzwaaiing door wind op gemeten magneetvelden, is voor het vaksegment tussen mast 19 en mast 20 in Maartensdijk berekend hoe groot de verandering in het magneetveld is (dB) bij een kleine verandering in de afstand vanaf de hartlijn (dx). Hierbij is aangenomen dat alle geleiders tegelijkertijd en in dezelfde mate uitzwaaien. Het resultaat van deze berekening is grafisch weergegeven in Figuur 21.

Uit Figuur 21 blijkt dat de invloed van uitzwaaiing op het berekende magneetveld het grootst is vlakbij de hartlijn. Op 4 m afstand van de hartlijn is het effect maximaal: een verschuiving van 1 m ten opzichte van de hartlijn levert een verandering in het berekende magneetveld op van $0,1$ microtesla.



Figuur 21 De verandering van de sterkte van het magneetveld (dB) bij een kleine verandering (dx) van de afstand (x) tot de hartlijn hangt af van de afstand tot de hartlijn. De berekening is uitgevoerd met behulp van het rekenmodel dat is opgesteld voor de Handreiking en gaat uit van een stroom van 50% van de ontwerpstroom

Ter hoogte van de grens van de berekende specifieke magneetveldzone (60 m afstand aan weerszijden van de hartlijn) is de verandering van het magneetveld marginaal: bij 1 m verschuiving ten opzichte van de hartlijn is de berekende verandering in het magneetveld 0,0038 microtesla.

Samenvattend geldt voor de berekening van de magneetvelden van het vaksegment tussen mast 19 en mast 20 van de hoogspanningslijn Utrecht Lage Weide - Soest:

- Het weglaten van de bliksemdraden (uitgangspunt in de Handreiking) heeft voor deze situatie geen effect op de berekende magneetvelden.
- Bij het meenemen van de bliksemdraden heeft de grootte van de mastweerstand geen effect op de berekende magneetvelden (alleen bij een mastweerstand van 0 Ω is er een effect, maar dit is geen realistische waarde. De mastweerstand speelt geen rol als de bliksemdraden niet worden meegenomen).
- Berekening van de magneetvelden voor één vaksegment (conform de Handreiking) geeft hetzelfde resultaat als berekening voor drie vaksegmenten.
- Uitzwaaiing van geleiders door wind heeft waarschijnlijk geen effect op de jaargemiddelde veldsterkte.
- Het magneetveld tijdens metingen bij harde wind of storm kan echter wel worden beïnvloed door uitzwaaiing, in het bijzonder dicht bij de geleiders. Op enige afstand, bijvoorbeeld ter hoogte van de rand van de specifieke magneetveldzone, is de invloed echter klein.

RIVM

De zorg voor morgen begint vandaag