

ONGERUBRICEERD

Gebouwde Omgeving
Van Mourik Broekmanweg 6
2628 XE Delft
Postbus 49
2600 AA Delft**TNO-rapport**www.tno.nl**TNO 2016 R10011****Verhouding tussen trilling in de bodem en in
een vliegtuigbom**

T +31 88 866 30 00

F +31 88 866 30 10

Datum	8 juli 2016
Auteur(s)	Ir. A.J. Bronkhorst Ir. E. Kroon Ing. E. Slis C. van Everdinck Ir. J. Pruiksmā
Aantal pagina's	80 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	5
Opdrachtgever	Gemeente Rotterdam, EODD
Projectnummer	053.03023

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2016 TNO

ONGERUBRICEERD

Samenvatting

Het voorschrift opsporen en ruimen van explosieven, druk 2 [VS-9-861, 2010] van de Explosieven Opruimings Dienst Defensie (EODD), geeft een richtlijn voor de veiligheidsafstand tussen constructiewerkzaamheden (heien, het slaan van een damwand) en een (mogelijke) blindganger. Deze richtlijn is gebaseerd op een rapport van de IFCO [Muller, 1990] waarin horizontale versnellingen van circa 1 m/s^2 als kritisch worden beschouwd. Er is echter weinig bekend over de gevoeligheid van het ontstekingsmechanisme in WOII vliegtuigbom-blindgangers voor trillingen ten gevolge van constructie-werkzaamheden zoals bijvoorbeeld heien. In [Kroon, Bouma, van Ham, 2015] wordt een inventarisatie gepresenteerd van ontstekertypen die voorkomen in Nederlandse bodem waarvan bepaalde typen worden ingeschat als mogelijk trillingsgevoelig. Voor deze typen is het de vraag bij welke versnelling de ontsteker functioneert.

In december 2012 heeft de Vereniging voor Explosieven Opsporing het initiatief genomen tot overleg over dit onderwerp met de gemeente Rotterdam, gemeente Zwolle, Prorail en de EODD. De gemeenten Rotterdam, Zwolle, Lingewaard en de EODD zijn bereid gevonden een financiële bijdrage te leveren aan wetenschappelijk onderzoek, uit te voeren door TNO. Het doel is het borgen van een veilige werk- en gebruiksomgeving in en nabij Conventionele Explosieven verdacht gebied en een bijdrage te leveren aan de doelmatigheid van opsporing en ruiming. Met de resultaten uit dit onderzoek kan mogelijk, afhankelijk van het type ontsteker, de trillingsnorm worden verhoogd of verlaagd, respectievelijk leidend tot een grotere en kleinere veiligheidsafstand tussen constructiewerkzaamheden en bom.

Het onderzoek betreft trillingen in de bodem die worden overgedragen op het vliegtuigbomlichaam en uiteindelijk inwerken op de ontsteker. Het onderzoek bestaat uit twee fases met de volgende werkpakketten [TNO Offerte, 2014]:

Fase I levert:

- A. een inventarisatie van alle ontstekertypen en een inschatting van hun trillingsgevoeligheid;
- B. resultaten van veldmetingen hoe trillingen in de bodem zich voortplanten in/door een bomlichaam;
- C. de vaststelling hoe trillingen op een ontsteker gesimuleerd worden met behulp van een triltafel.

Fase II levert trillingscriteria per ontstekertype op basis van trillingsexperimenten op een triltafel.

Dit rapport beschrijft een literatuurstudie en trillingsmetingen die zijn uitgevoerd om een inschatting te kunnen maken van de trillingsniveaus ter plaatse van de ontsteker in een vliegtuigbom voor verschillende afstanden tussen trilbron en bom. Op basis van de literatuurstudie is een rekenmodel gedefinieerd waarmee een inschatting kan worden gemaakt van de trillingsniveaus in de bodem als functie van de afstand tot en de sterkte van een trilbron. Met behulp van de metingen kan een verhoudingsfactor worden afgeleid, waarmee het trillingsniveau in de bodem kan worden omgerekend naar een trillingsniveau in de ontsteker. Bij deze metingen zijn trillingen gegenereerd in de bodem en in een vliegtuigbom met behulp van een excitator (trilplaat) aan het oppervlak.

De response is gemeten met behulp van versnellingsopnemers nabij de excitator, in de grond nabij de bom en op de locatie van de ontsteker in de bom.

De metingen zijn uitgevoerd:

1. In verschillende typen grond (kleigrond en zandgrond);
2. Op verschillende afstanden tussen trillingsbron en ontstekingsmechanisme (5, 10 en 20 m);
3. Bij verschillende oriëntaties van de bom (horizontaal en verticaal);
4. Bij verschillende aanstootrichtingen van trillingsbron naar ontstekingsmechanisme (trilbron in lijn met de versnellingsopnemers in de bom en grond en haaks op de lijn tussen de opnemers in de bom en grond).

Met behulp van het vermogensspectrum van de gemeten trilsignalen is de precieze aanstootfrequentie van de excitator bepaald. Als functie van frequentie is de overdracht bepaald van de sensor nabij de trilplaat naar:

- De sensor in de grond naast de bom (trilbron – grond);
- De sensor bevestigd op de dummy ontsteker in de bom (trilbron – bom).

De verhouding tussen het trillingsniveau in de bodem naast de bom en het trillingsniveau ter plaatse van de ontsteker in de bom is afgeleid uit deze overdrachten. Deze verhouding is bepaald voor verschillende frequentie bereiken relevant voor verkeer, heien en het trillen van damplanken.

Uit de meetresultaten blijkt dat:

- Voor frequenties tot 30 Hz de trilling in de bom zich verhoudt tot de trilling in de bodem met een factor 1 tot 2, onafhankelijk van de meetconfiguratie;
- Voor frequenties tussen 30 en 60 Hz de trilling in de bom zich verhoudt tot de trilling in de bodem met een factor:
 - 1 tot 2 voor een verticale bom oriëntatie in een kleigrond;
 - 2 tot 4 voor een horizontale bom oriëntatie in een zandgrond.

Op basis van de huidige dataset is niet goed te duiden welke factor verantwoordelijk is voor de waargenomen verschillen tussen de twee grondtypen omdat zowel de oriëntatie als de diepte van de bom zijn gevarieerd voor de testlocaties. Er kan ook geen eenduidige verklaring worden gegeven voor de gemeten trillingen die in de bom significant hoger zijn dan in de grond voor frequenties boven de 30 Hz. Factoren die mogelijk een rol spelen zijn de potentiële resonantie van het bomlichaam of van de ontsteker in de bom, de reflectie van trillingen en de natuurlijke heterogeniteit van de grond. De laatste twee factoren resulteren in de variabiliteit die typisch voorkomt bij grondmetingen, zoals ook blijkt uit de literatuur.

Op basis van de meetresultaten wordt aanbevolen om in Fase II metingen uit te voeren bij een horizontale en verticale oriëntatie van de ontsteker op een triltafel.

Inhoudsopgave

	Samenvatting	2
1	Inleiding	5
1.1	Aanleiding	5
1.2	Onderzoeksopzet.....	5
1.3	Deelonderzoek Fase 1 deel B	6
2	Achtergrond	8
2.1	EODD richtlijn	8
2.2	Grondtrillingen	9
2.3	Trilbronnen.....	14
2.4	Rekenmodel trillingsniveau in een ontsteker	24
3	Beschrijving testopstelling.....	27
3.1	Locaties	27
3.2	Bom en ontsteker.....	31
3.3	Trilbron.....	33
3.4	Versnellingsopnemers	34
3.5	Test configuraties	34
3.6	Data acquisitie	37
4	Verhouding trilling in grond en bom	38
4.1	Analyse	39
4.2	Resultaat.....	42
5	Conclusies en aanbevelingen	44
6	Referenties	46
7	Ondertekening	50
	Bijlage(n)	
	A Bodemprofielen	
	B Gegevens US Army-Navy 1000 Bomb GP	
	C Dataverwerking	
	D Resultaat veldmetingen Zestienhoven en Kop van de Beer	
	E Kalibratiegegevens versnellingsopnemers	

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

In juli 2012 heeft TNO een analyse en advies afgegeven aan de gemeente Zwolle met betrekking tot de mogelijke aanwezigheid en kans op detonatie van niet-ontplofte Tweede Wereldoorlog (WOII) 500 lb vliegtuigbommen (blindgangers) onder woonhuizen in de wijk Holtenbroek [Kroon & van Ham, 2012]. Geadviseerd werd om conform [Muller, 1990] een gebied met een straal van 50 m af te bakenen. Dit advies wijkt af van de richtlijn [Huibers, 1990] voor de Explosieven Opruimings Dienst Defensie (EODD):

- Heien op een afstand van minder dan 10 m van een mogelijke blindganger kan zeer wel mogelijk een detonatie van die blindganger veroorzaken;
- Het is onwaarschijnlijk dat heien op een afstand tussen de 10 en 50 m van een mogelijke blindganger een detonatie van die blindganger veroorzaakt;
- Het is praktisch onmogelijk dat heien op een afstand van meer dan 50 m van een mogelijke blindganger detonatie van die blindganger veroorzaakt¹.

[VEO, 2013] concludeert dat de afwijking tussen het TNO advies aan de gemeente Zwolle en de EODD richtlijn onduidelijkheid creëert over de te hanteren veiligheidsafstand bij trillingsveroorzakende activiteiten in de nabijheid van een Conventioneel Explosief (CE). Dit geldt voor lopende projecten maar ook voor de planning en uitvoering van nieuwe (ruimtelijke) ontwikkelingen in of nabij een CE verdacht gebied. Ook is er onduidelijkheid bij het plaatsen van een damwandkuip rondom een vermoede locatie van een CE zoals gebruikt wordt door opsporingsbedrijven voor het benaderen (blootleggen) van een CE. Het is al een jarenlange praktijk dat de damwandkuip doorgaans op een afstand van 3 m van de vermoede locatie van het CE wordt geplaatst. Daarbij kunnen trillingsniveaus optreden hoger dan 1 m/s².

[VEO, 2013] stelt dat deze onduidelijkheid onwenselijk is. In december 2012 heeft de Vereniging voor Explosieven Opsporing (VEO) daarom het initiatief genomen tot overleg over dit onderwerp met de gemeente Rotterdam, gemeente Zwolle, Prorail en de EODD. De VEO heeft de gemeenten Rotterdam, Zwolle en Lingewaard en de EODD bereid gevonden een financiële bijdrage te leveren aan onderzoek door TNO.

1.2 Onderzoeksopzet

Het doel van het onderzoek is:

- het borgen van een veilige werk- en gebruiksomgeving in en nabij CE verdacht gebied;
- een bijdrage te leveren aan de doelmatigheid van opsporing en ruiming van CE.

Met de resultaten uit dit onderzoek kan mogelijk, afhankelijk van het type ontsteker, de trillingsnorm zowel worden verhoogd als verlaagd (respectievelijk leidend tot een grotere en kleinere veiligheidsafstand).

¹ Opvallend is de abrupte overgang in kans op detonatie van “zeer wel mogelijk” naar “onwaarschijnlijk” bij heien op een afstand rond de 10 meter van een mogelijke blindganger.

Kennis over de trillingsgevoeligheid van ontstekingsmechanismen levert ook kennis en informatie op die breder toepasbaar is, bijvoorbeeld voor het beoordelen van risico's in de projectgebonden risicoanalyse en voor de methode van het tijdelijk veiligstellen en ruimen van CE.

Het totale onderzoek bestaat uit 2 fases met de volgende werkpakketten:

Fase 1

- Deel A
 - a. Een inventarisatie van alle ontstekertypen in blindgangers die in Nederlandse bodem worden aangetroffen;
 - b. Het maken van onderscheid tussen ontstekertypen die wel en niet trillingsgevoelig zijn, of worden na veroudering;
 - c. Verificatie van de bevindingen bij derden;
- Deel B
 - a. Een studie (en indien mogelijk experimenteel onderzoek) naar trillingen in de bodem tijdens het slaan van damwanden, heien en weg- en treinverkeer;
 - b. Bepalen hoe trillingen in de bodem zich voortplanten in/door een bomlichaam;
- Deel C
Vaststellen hoe trillingen gesimuleerd kunnen worden voor een ontsteker op een triltafel (shaker). Globaal vaststellen hoe het testprogramma van de tweede fase gedefinieerd is.

Fase 2

- Deel D:
Opstellen van een definitief testprogramma;
- Deel E:
Uitvoeren van trillingsexperimenten op de ontstekertypen die gevoelig zijn voor trillingen, en het afleiden van trillingscriteria voor ontsteking per type.

Fase 1 deel A is beschreven in [Kroon, Bouma, van Ham, 2015]. Op basis van ingeschatte trillingsgevoeligheid en frequentie van aantreffen wordt geadviseerd een zevental impact ontstekers te onderzoeken naar trillingsgevoeligheid.

Dit rapport beschrijft Fase 1 deel B van het onderzoek.

1.3 Deelonderzoek Fase 1 deel B

Er is kennis over grondtrillingen ten gevolge van constructie werkzaamheden en verkeer. Bevindingen van een literatuuronderzoek naar deze kennis zijn beschreven in hoofdstuk 2. Er is echter geen kennis over hoe een trilling in de grond zich voortplant door een bomlichaam en inwerkt op een ontsteker in de bom. Deze kennis is benodigd om een grens te kunnen definiëren voor de veilige afstand tussen een trillingsbron en een bom.

Doel van dit deel van het onderzoek is de bepaling van een verhoudingsfactor tussen het trillingsniveau in de grond nabij de bom en het niveau gemeten in de ontsteker. Met behulp van deze verhoudingsfactor en de al aanwezige kennis over trillingsniveaus in de grond is een inschatting te maken van de te verwachten trillingsniveaus ter plaatse van de ontsteker voor verschillende afstanden tussen trilbron en bom.

In combinatie met de trillingsexperimenten op verschillende ontstekertypen die zullen worden uitgevoerd in fase 2 is dan een veilige afstand te definiëren tussen trillingsbron en bom. Bij de bepaling van dit soort verhoudingsfactoren voor bijvoorbeeld woningen, wordt er over het algemeen een reductie in het trillingsniveau waargenomen [Zandbergen en Opstal, 2014]. In onderdelen van gebouwen (gevels of vloeren) worden wel toenames gespecificeerd door bijvoorbeeld [CUR 166, 1997]. Omdat een bom zich waarschijnlijk meer zal gedragen als een fundering dan een gebouwonderdeel, is de verwachting dat de bom in een reductie zal resulteren van de trillingsniveaus in de grond.

Hoofdstuk 2 beschrijft een literatuurstudie naar grondtrillingen ten gevolge van constructiewerkzaamheden en verkeer. Ook wordt hier een model gedefinieerd waarmee trillingen in de ontsteker bepaald kunnen worden, gegeven bekende relaties voor de trillingsniveaus met afstand. Om de resulterende trilling op een ontsteker in een bom te bepalen als gevolg van trillingen in de grond zijn trillingsexperimenten uitgevoerd. De opstelling van de in-situ testen, om deze verhouding te kwantificeren, is beschreven in hoofdstuk 3. Hoofdstuk 4 geeft de resultaten van de testen en de afgeleide verhoudingsfactoren tussen de trilling in de bom en in de grond. Hoofdstuk 5 presenteert conclusies en aanbevelingen.

2 Achtergrond

2.1 EODD richtlijn

De richtlijn voor de Explosieven Opruimings Dienst Defensie (EODD), opgesteld door [Huibers, 1990] stelt dat:

- Heien op een afstand van minder dan 10 m van een mogelijke blindganger kan zeer wel mogelijk een detonatie van die blindganger veroorzaken;
- Het is onwaarschijnlijk dat heien op een afstand tussen de 10 en 50 m van een mogelijke blindganger een detonatie van die blindganger veroorzaakt;
- Het is praktisch onmogelijk dat heien op een afstand van meer dan 50 m van een mogelijke blindganger detonatie van die blindganger veroorzaakt².

Deze richtlijn is overgenomen in het Voorschrift opsporen en ruimen van explosieven, druk 2 [VS-9-861, 2010] van de EODD met deze toevoeging voor trein- en wegverkeer:

- Binnen 150 meter van het explosief kan een snelheidsrestrictie opgelegd worden aan trein- en wegverkeer, afhankelijk van type en toestand van de ontsteker (maximaal 8 km/uur).

Deze richtlijn is gebaseerd op onderzoek van het Instituut voor Funderingscontrole (IFCO) [Muller, 1990]. Hierin wordt gesteld dat op 50 m van de trillingsbron versnellingen vergelijkbaar worden aan de natuurlijke achtergrond trilling van 0,15 m/s². Dit is volgens [Muller, 1990] het trillingsniveau dat onder normale gebruikscondities op het maaiveld wordt gemeten³. [Muller, 1990] stelt tevens dat op 10 m vanaf de heipaal:

- horizontale versnellingen optreden van circa 1 m/s² bij een frequentie van 10 – 20 Hz (voorwerpen met een wrijvingscoëfficiënt van 0,1 gaan schuiven bij dit versnellingsniveau);
- geen grondverschuivingen van betekenis worden verwacht.

[Muller, 1990] merkt daarbij op dat het de IFCO, opererend als grondmechanisch adviesbureau, aan de kennis ontbreekt om een uitspraak te doen over of het ontstekingsmechanisme bij een versnelling van circa 1 m/s² tot ontsteking zal komen. Deze onzekerheid ondermijnt feitelijk de onderbouwing van de EODD richtlijn. In WOII zijn er veel verschillende typen ontstekers toegepast en de verwachting is dat de trillingsgevoeligheid per type varieert.

Een aantal onderwerpen worden niet goed afgedekt door Muller (1990), waardoor er onzekerheid is over de betrouwbaarheid van de EODD richtlijn:

1. Er wordt geen rekening gehouden met verschillende grondsoorten die in Nederland kunnen voorkomen, en de invloed hiervan op de trillingsniveaus op verschillende afstanden van de trillingsbron;

² Opvallend is de abrupte overgang in kans op detonatie van “zeer wel mogelijk” naar “onwaarschijnlijk” bij heien op een afstand rond de 10 meter van een mogelijke blindganger.

³ Gebaseerd op metingen te Schiphol-Oost in november 1989 [Muller, 1990],

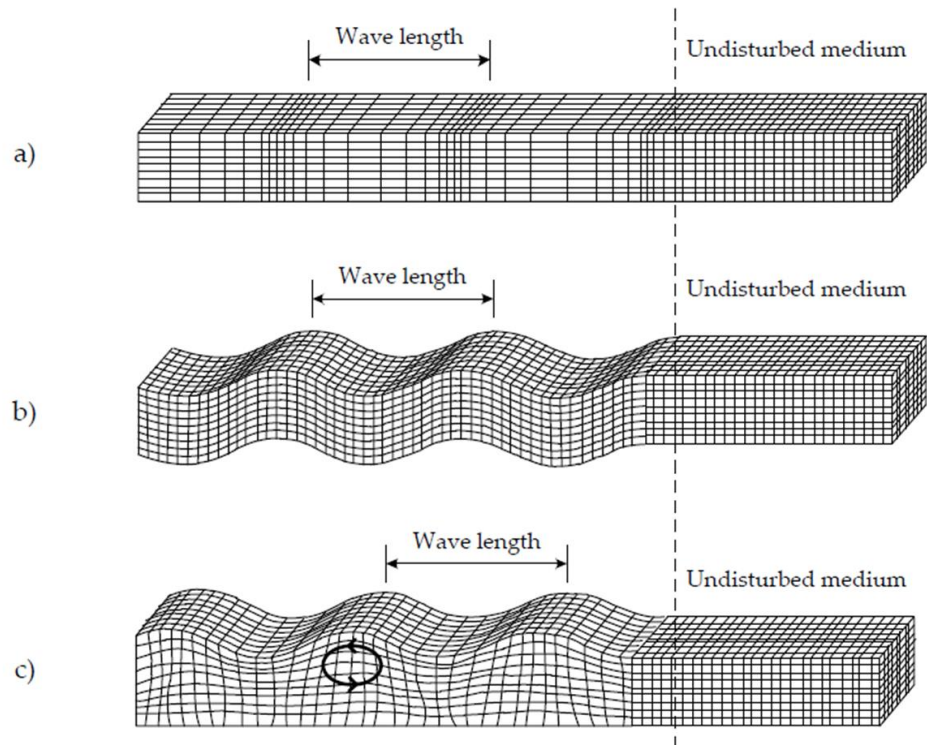
2. Er wordt geen rekening gehouden met relevante trillingskarakteristieken (bijvoorbeeld dominante frequentiebereik en demping) van andere trillingsbronnen dan heien, zoals het trillen van damwanden of trein- en wegverkeer;
3. Er wordt geen rekening gehouden met de trillingsoverdracht van de grond naar de ontsteker in de bom;
4. Er wordt geen rekening gehouden met de gevoeligheid van verschillende typen ontstekers voor trillingen.

Het huidige deelonderzoek focust op de eerste 3 punten. Voor de eerste 2 punten is een literatuuronderzoek uitgevoerd dat is beschreven in dit hoofdstuk. Voor punt 3 zijn in-situ metingen uitgevoerd. De testopzet en resultaten zijn beschreven in hoofdstuk 3 en 4.

2.2 Grondtrillingen

2.2.1 Golven

Trillingen in de grond planten zich voort door middel van golven. Figuur 1 illustreert drie golftypen die voorkomen bij bodemtrillingen in de nabijheid van het grondoppervlak. De golven weergegeven in Figuur 1(a) en (b) zijn ook wel bekend als ruimtegolven, omdat ze zich door het gehele grondvolume voortplanten. De Rayleigh golf, weergegeven in Figuur 1(c), is een oppervlaktegolf, en bevindt zich dus alleen aan het grondoppervlak.

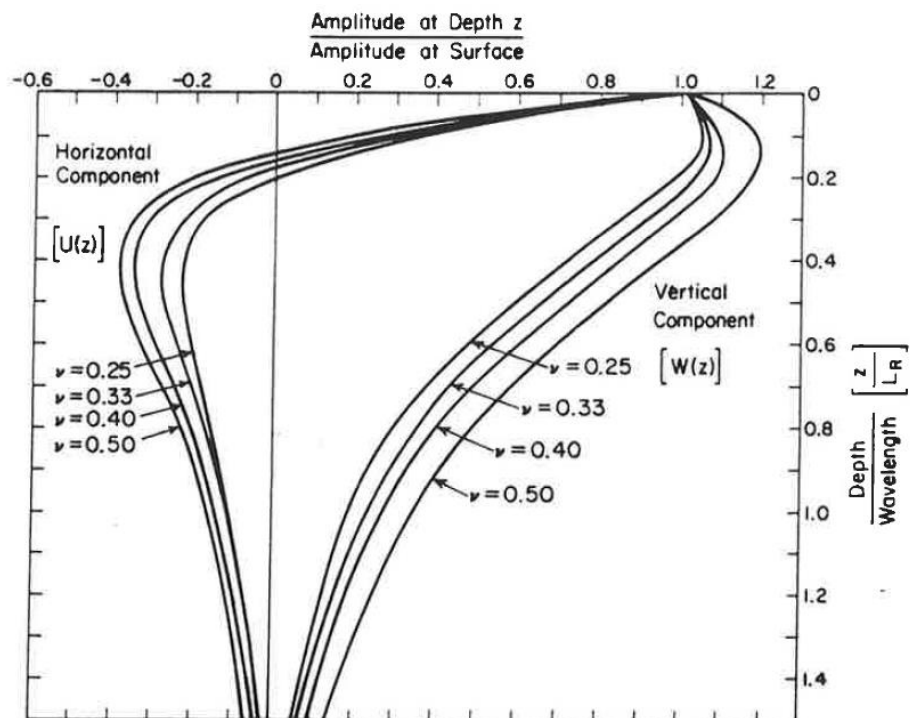


Figuur 1 Schematische weergave van de golftypen die voorkomen bij grondtrillingen [Deckner, 2013]: (a) drukgolf, (b) schuifgolf, (c) Rayleigh golf.

[Miller en Pursey, 1954, 1955] hebben voor een cilindervormige puntbron die loodrecht trilt ten opzichte van het oppervlak, aangetoond dat bij een Poisson ratio van 0.25, 67% van de trillingsenergie in Rayleighgolven wordt omgezet, 26% in schuifgolven en 7% in drukgolven.

De sterkte van de Rayleigh golf is afhankelijk van de afstand tot het grondoppervlak. Figuur 2 illustreert de horizontale en verticale trillingsamplitude (genormaliseerd tegen de amplitude aan het oppervlak) van de Rayleigh golf als functie van de diepte d , Poisson ratio ν en golflengte λ . Aan het maaiveld is de verticale trillingscomponent ongeveer 1.4 – 2 maal groter dan de horizontale component.

Ten eerste valt op dat de horizontale component snel kleiner wordt met diepte, en dat de verticale component eerst iets groter wordt, om daarna vanaf een diepte van $0.2 - 0.4 \lambda$ ook gestaag af te nemen. Gegeven de afhankelijkheid van ν en λ , volgt dat zowel de homogeniteit en de golfsnelheid invloed hebben op de mate van invloed van de Rayleigh golf. Vooral de golfsnelheid is bepalend voor de diepte invloed, een grotere golfsnelheid geeft een grotere golflengte (bij dezelfde frequentie) en dus invloed tot een grotere diepte. Ter illustratie: voor een Rayleigh golfsnelheid $c_R = 100$ m/s en een frequentie van $f = 20$ Hz volgt een golflengte van $\lambda = 5$ m (want $\lambda = c_R/f$). Het punt waar de horizontale trillingsamplitude 0 wordt en de verticale trillingsamplitude maximaal is (in Figuur 2), ligt in dit geval op ongeveer 1 m diepte.



Figuur 2 Horizontale en verticale trillingsamplitude van de Rayleigh golf als functie van de diepte [Staalduinen et al., 1991a].

2.2.2 *Golfvoortplantingssnelheid*

Elk type golf heeft een bepaalde voortplantingssnelheid, deze is afhankelijk van de materiaaleigenschappen van het medium, zie bijvoorbeeld [CUR 166, 1997] of [Deckner, 2013] voor een uitgebreide beschrijving. Normaal gesproken geldt dat drukgolven sneller zijn dan schuifgolven, en schuifgolven een beetje sneller dan Rayleighgolven. Tabel 1 geeft een aantal golfsnelheden in verschillende materialen en grondtypen. Ten eerste valt op dat schuifgolven (c_s) en Rayleighgolven (c_R) geen snelheid hebben in lucht en water, dit komt doordat deze golven zich niet kunnen voortplanten in een vloeibaar of gasvormig medium (want lucht en water hebben een verwaarloosbaar kleine afschuifmodulus). Verder is te zien dat de voortplantingssnelheid van drukgolven (c_p) sterk wordt beïnvloed door de aanwezigheid van (grond)water. Omdat schuif- en Rayleighgolven zich niet kunnen voortplanten in water, is de invloed van grondwater veel kleiner. De lichte verandering in voortplantingssnelheden van deze golven wordt alleen veroorzaakt door de verandering in gronddichtheid.

Tabel 1 Typische golfsnelheden in verschillende materialen en grondtypen [Head en Jardine, 1992].

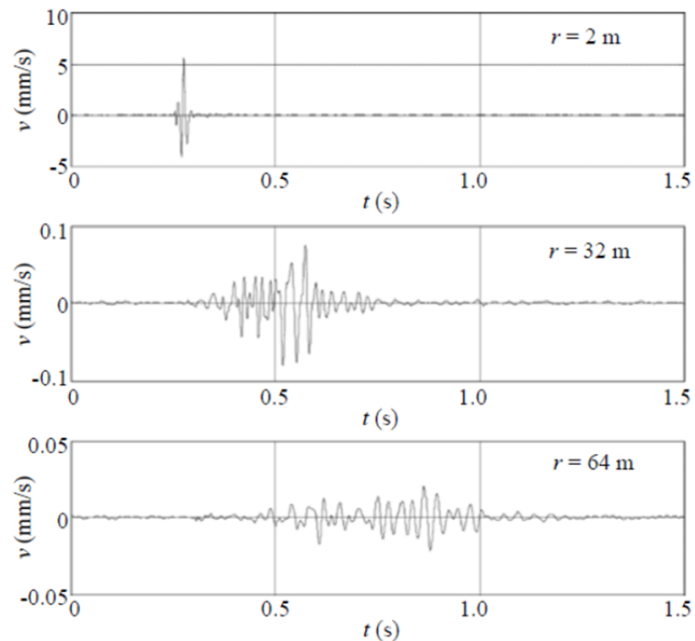
Grondsoort	c_p [m/s]	c_s [m/s]	c_R [m/s]
Lucht	344	0	0
Water	1480 – 1520	0	0
Graniet	4500 – 5500	3000 – 3500	2780 – 3245
Verzadigd zand	1400 – 2000	100 – 400	90 – 370
Droog zand	200 – 800	150 – 500	140 – 460
Klei onder grondwater	1450 – 1900	80 – 500	75 – 465
Klei boven grondwater	100 – 600	40 – 300	35 – 275
Humus	1480 – 1520	30 – 50	25 – 45

2.2.3 *Golfverschijnselen: reflectie, refractie en dispersie*

Indien er verschillen zijn in de akoestische impedantie van twee materialen kunnen reflectie en refractie optreden wanneer een golf overgaat van het ene materiaal in het andere materiaal. Refractie is de verandering in richting van het golffront bij deze overgang. Reflectie treedt op wanneer de energie in de golf niet volledig van het ene materiaal aan het andere materiaal wordt overgedragen.

Als twee of meer golven gelijktijdig voorkomen op een bepaald punt in een ruimte dan is de amplitude van de lokale trilling gelijk aan de som van de amplitudes van de afzonderlijke golven. Dit verschijnsel, interferentie, kan zowel voor een versterking als een verzwakking van het lokale trillingsniveau zorgen. De combinatie van refractie, reflectie en interferentie van golven zorgt ervoor dat het in gelaagde media zeer complex is om versterkingen en verzwakkingen te voorspellen [Möller et al., 2000].

Voor een golf geldt altijd dat golflengte en frequentie aan elkaar gerelateerd zijn via de voortplantingssnelheid volgens: $\lambda = c/f$. Als de voortplantingssnelheid in een medium afhankelijk is van de frequentie, dus $c = c(f)$, dan is er sprake van dispersie. Dit is vergelijkbaar met de kleurschifting van licht dat door een prisma valt. Figuur 3 illustreert het effect van dispersie op een tijdsignaal afkomstig van heien. Hieruit is op te maken dat met afstand de impuls respons steeds meer wordt uitgesmeerd in de tijd. Dit is het gevolg van de verschillende golfsnelheden bij verschillende frequenties.



Figuur 3 Tijdsregistraties van een impuls respons op verschillende afstanden van de bron [Auersch en Said, 2010].

2.2.4 Grond trillingskarakteristieken

De eigenfrequentie is de frequentie waar een systeem in gaat trillen als het wordt aangeslagen (bijvoorbeeld zoals een gitaarsnaar op één frequentie tilt na aangeslagen te zijn). Afhankelijk van de hoeveelheid demping kan een systeem dat aangeslagen wordt nabij zijn eigenfrequentie in resonantie geraken. Dit betekent dat de amplitude waarmee het systeem reageert groter is dan de amplitude waarmee het wordt aangeslagen.

Aan grond kan op zich geen eigenfrequentie worden toegekend. Wel is er een frequentiebereik voor elk grondtype waarbinnen trillingen zich makkelijker voortplanten en minder snel worden gedempt. Tabel 2 geeft het "natuurlijke" frequentiebereik voor verschillende grondsoorten.

Tabel 2 Frequentie bereiken waarbinnen grondtrillingen makkelijker propageren [Deckner, 2013].

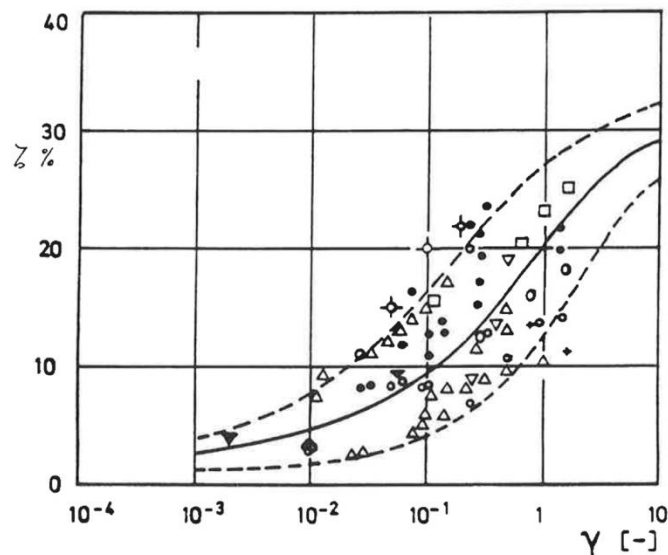
Grondsoort	"Natuurlijk" frequentie bereik
Klei	5 – 20 Hz
Peat	10 – 13 Hz
Klei	10 – 25 Hz
Zand en gravel	30 – 40 Hz
Zacht gesteente	30 – 80 Hz
Hard gesteente	> 50 Hz

Er worden over het algemeen twee vormen van demping onderscheiden bij bodemtrillingen. De eerste vorm wordt aangeduid met geometrische demping (of verzwakking). Doordat de trillingsenergie die door de bron de grond in wordt gebracht zich over een steeds groter oppervlak verdeeld wordt het trillingsniveau navenant kleiner. De grootte van deze demping is afhankelijk van het type golf. Ruimtegolven dempen namelijk sneller uit dan oppervlaktgolven.

De tweede vorm is materiaaldemping en wordt veroorzaakt door inwendige wrijving in de grond ten gevolge van de vervorming. In [Staalduinen et al., 1991a] wordt op basis van het dissipatief gedrag van de grond een eenvoudig model afgeleid waarmee de materiaaldemping in rekening kan worden gebracht:

$$A(x) = A_0 e^{-2\pi f(x-x_0)\zeta/c} = A_0 e^{a(x-x_0)} \quad [1]$$

Hierin zijn $A(x)$ en A_0 de trillingsamplitudes op afstand x en x_0 , f is de frequentie, ζ is de dempingsmaat en c is de voortplantingssnelheid van de trilling in de bodem. Uit deze vergelijking volgt dat de materiaaldemping a afhankelijk is van de frequentie, de voortplantingssnelheid, en de dempingsmaat. De dempingsmaat is afhankelijk van de mate waarin het bodemmateriaal vervormd wordt door de trilling. In Figuur 4 is te zien dat bij een grote deformatie (hoekverdraaiing $\gamma > 10^{-5}$) de demping sterk toeneemt. Op afstanden groter dan 5 m en meer zijn de hoekverdraaiingen in het algemeen kleiner dan 10^{-3} .



Figuur 4 De dempingsmaat ζ als functie van de vervormingshoek γ [Haupt, 1986].

2.2.5 Voorspellen trillingsniveaus

De demping van de trillingsamplitude met afstand kan worden beschreven met de Bornitz vergelijking [Richart et al., 1970]:

$$u = u_0 (x_0/x)^n e^{-a(x-x_0)} \quad [2]$$

Hierin zijn u_0 en u trillingsamplitudes op afstanden x_0 en x van de trillingsbron, n is de geometrische demping en a is de materiaaldemping.

De waarde van de geometrische demping n is afhankelijk van het golf- en brontype [Kim en Lee, 1998]. Voor bronnen aan het oppervlak wordt er onderscheid gemaakt tussen punt- en lijnbronnen. In het geval van een puntbron neemt de trillingssnelheid kwadratisch af met afstand voor ruimtegolven ($n = 2$), voor oppervlaktegolven is de afname gelijk aan de wortel van de afstand ($n = 0.5$). In het geval van een oneindige lijnbron, is de afname lineair ($n = 1$) met afstand voor ruimtegolven. Er is in dit geval geen sprake van geometrische demping voor oppervlakte golven ($n = 0$).

De materiaaldemping α is afhankelijk van frequentie en grondtype (via de voortplantingssnelheid en dempingsmaat, zoals beschreven in de voorgaande paragraaf). Tabel 3 geeft een classificatie voorgesteld door [Woods, 1997].

Tabel 3 Classificatie van materiaaldempingswaarden naar grondtype en frequentie [Woods, 1997].

Class	Material damping coefficient [1/m]		Material
	5 Hz	50 Hz	
I	0.01 – 0.033	0.1 – 0.3	Weak or soft soils
II	0.0033 – 0.01	0.03 – 0.1	Competent soils
III	0.00033 – 0.0033	0.003 – 0.03	Hard soils
IV	< 0.00033	< 0.003	Hard, competent rock

2.3 Trilbronnen

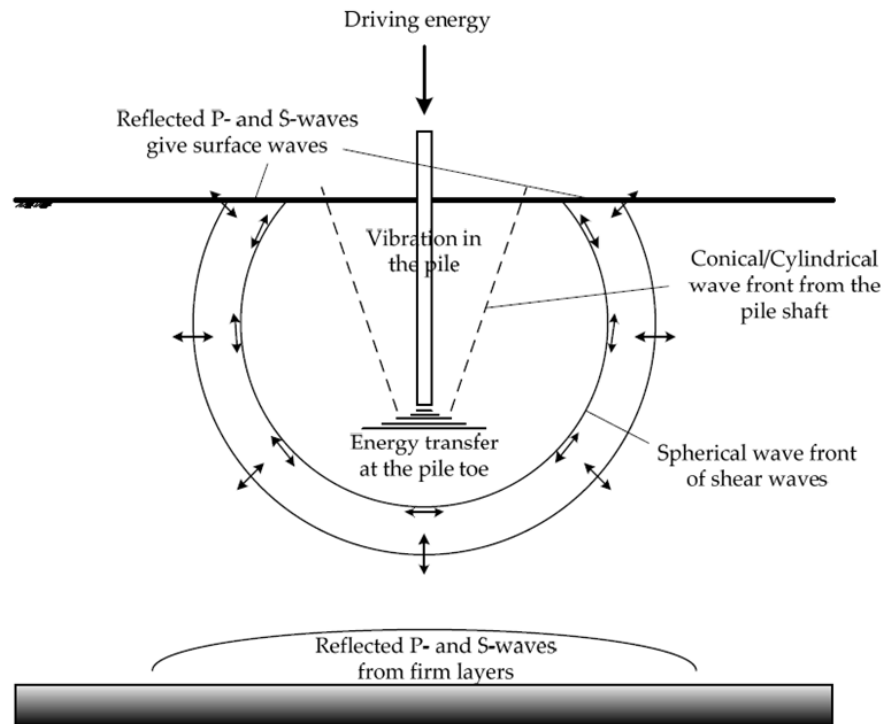
De EODD richtlijn specificeert aanbevelingen voor trillingswerkzaamheden, zoals heien en damwandtrillen, maar ook voor trillingen ten gevolge van verkeer. Hierna volgt een beschrijving van deze trillingsbronnen en worden relevante karakteristieken toegelicht.

2.3.1 Heien en damwandtrillen

Bronbeschrijving

Figuur 5 geeft een schematische weergave van de verschillende golven tijdens heien en damwandtrillen. Hierbij is onderscheid te maken tussen de tip en de schacht. Bij de tip worden zowel druk- als schuifgolven gegenereerd die in een bolvormig oppervlak van de tip propageren. De weerstand van de schacht resulteert in een conisch oppervlak van schuifgolven. Als de druk- en schuifgolven het grondoppervlak bereiken wordt een gedeelte van de energie omgezet in Rayleighgolven, het overige deel wordt terug de grond in gereflecteerd als ruimtegolven. De Rayleighgolven propageren langs het oppervlak, resulterend in een horizontale en verticale trillingsbeweging.

De beschrijving van golven in Figuur 5 is een gesimplificeerde weergave van de werkelijkheid. Deze is gebaseerd op de aanname dat alleen elastische vervormingen van de grond belangrijk zijn voor de propagatie van trillingen. Daarnaast zorgen reflecties en refractie door lagere grondlagen en de interactie van de golven tussen tip en schacht voor een grote variatie aan trillingsniveaus rondom de heipaal of damwand.

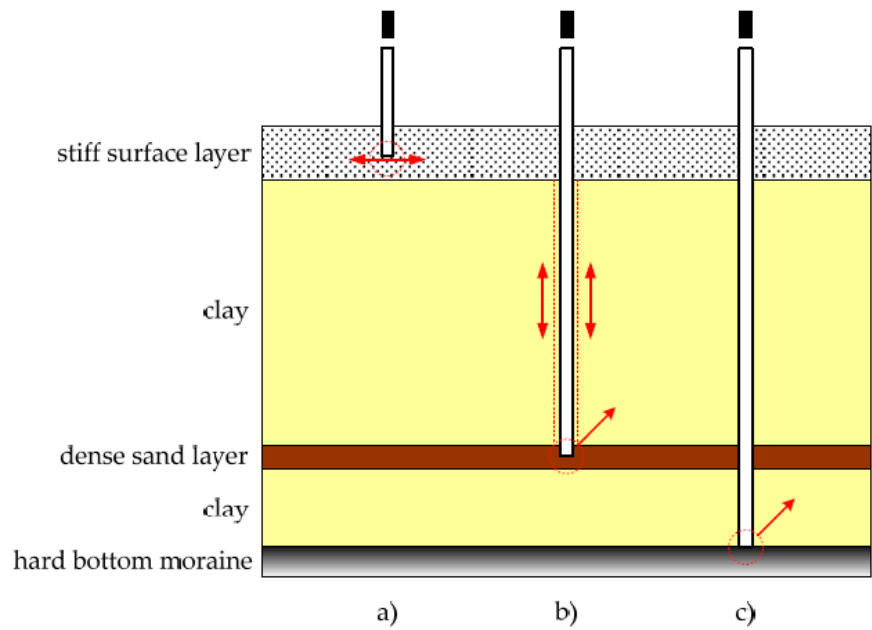


Figuur 5 Schematische weergave van de golf types die gegenereerd worden tijdens heien en intrillen van damwanden [Deckner, 2013].

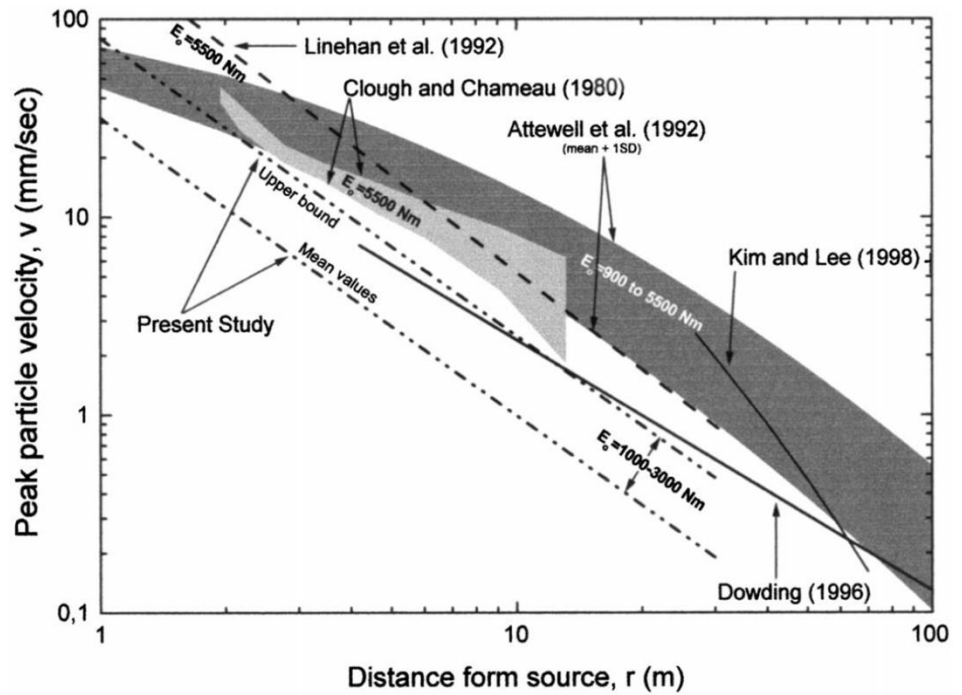
Bij heien en trillen kunnen de verandering in diepte van de paal of damwand een belangrijke rol spelen wanneer de geologische condities variëren met de diepte en daarmee de energie overdracht naar de grond. [Massarsch, 2004] laat bijvoorbeeld zien dat bij de installatie van heipalen drie situaties kunnen optreden, zie Figuur 6:

- Bij heien in een stijve toplaag bevindt de energie bron zich aan het oppervlak en planten trillingen zich voornamelijk voort als oppervlaktegolven;
- Bij heien in een zandlaag met gemiddelde dichtheid wordt de energie voornamelijk doorgegeven langs de schacht van de heipaal in de vorm van schuifgolven;
- Bij heien in een zandlaag met hoge dichtheid of in harde onderlaag wordt de energie ook doorgegeven als druggolven aan de onderzijde (voet) van de heipaal.

Aangezien er zoveel invloeden een rol spelen, zijn de bandbreedtes voor trillingsmetingen aan het maaiveld bij heien en damwanden groot en wordt er ook veel spreiding tussen studies gevonden. Figuur 7 geeft de resultaten van verschillende studies voor de piek trillingssnelheid aan het maaiveld op verschillende afstanden van de trillingsbron; er zijn aanzienlijke verschillen waarneembaar tussen de resultaten van de verschillende studies.



Figuur 6 Typische bronnen voor grondtrilling tijdens het heien van palen [Massarsch, 2004].



Figuur 7 Overzicht van resultaten uit verschillende studies voor de piek trillingsnelheid aan het maaiveld op verschillende afstanden van de trillingsbron [Athanasopoulos & Pelekis, 2000].

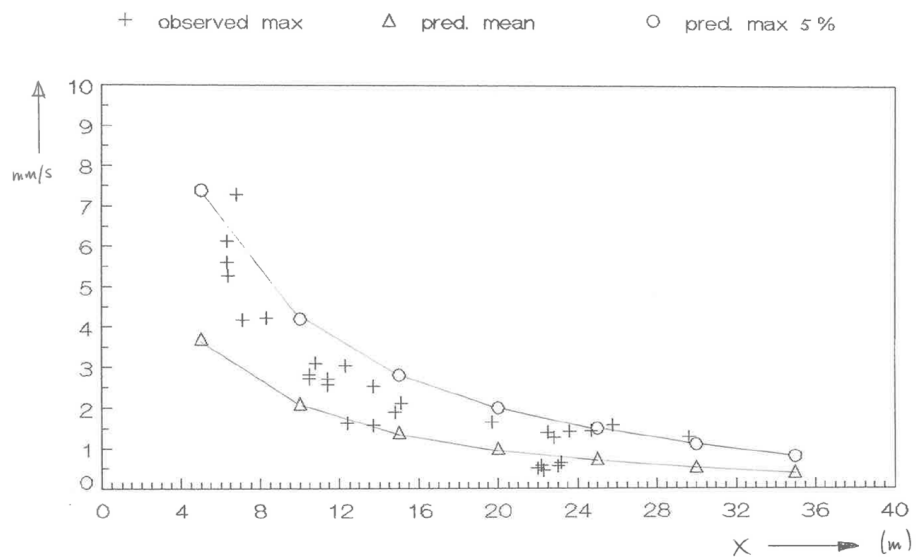
Trillingskarakteristieken

Tabel 4 geeft een karakterisering van het soort trilling en het bereik aan dominante frequenties bij heien en damwandtrillen. Bij damwandtrillen worden continue trillingen gegenereerd, hierbij wordt de grond geforceerd om in de frequentie van de aanstoting te bewegen. Om deze reden is er een één-op-één relatie tussen het toerental en de dominante frequentie. Bij heien wordt de grond over een grotere range aan frequenties aangeslagen, de frequenties waar de grond meer gevoelig voor is zullen sterker aanwezig zijn in het trillingssignaal. Volgens [Borel et al., 2002] speelt de resonantie van de damwand (uit het vlak) een belangrijke rol voor horizontale trillingen in de grond. Bij het trillen van damwanden, kunnen de resonantiefrequenties uit het vlak tussen 1 en 17 Hz liggen.

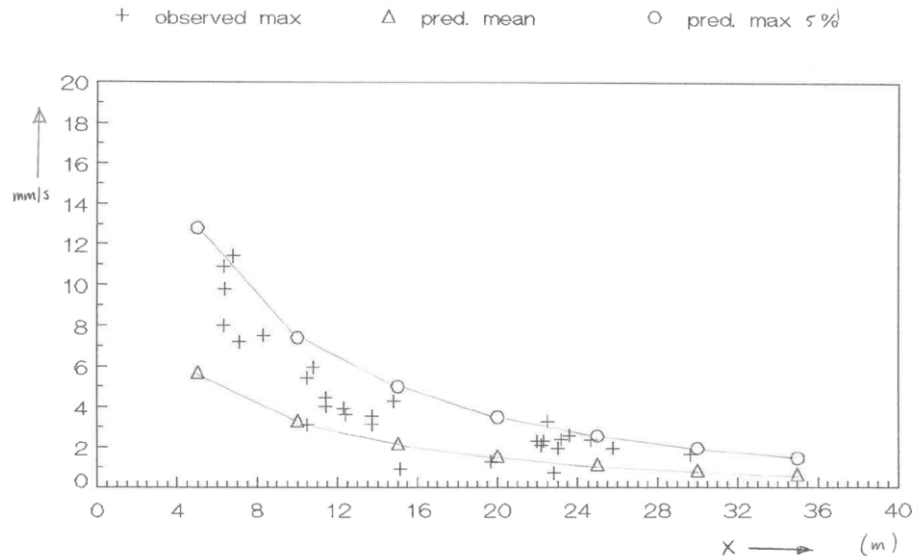
Tabel 4 Algemene dominante frequentie van trillingsbronnen en soort trilling [Muller, 2007].

Trillingsbron	Soort trilling	Dominante frequentie
Heien van palen	Herhaald kortdurend	5 – 25 Hz
Hoogfrequent trillen van damplanken (vibrator 1800 – 2300 toeren/min)	Continu	30 – 40 Hz
Laagfrequent trillen van damplanken (vibrator 1200 – 1500 toeren/min)	Continu	20 – 25 Hz

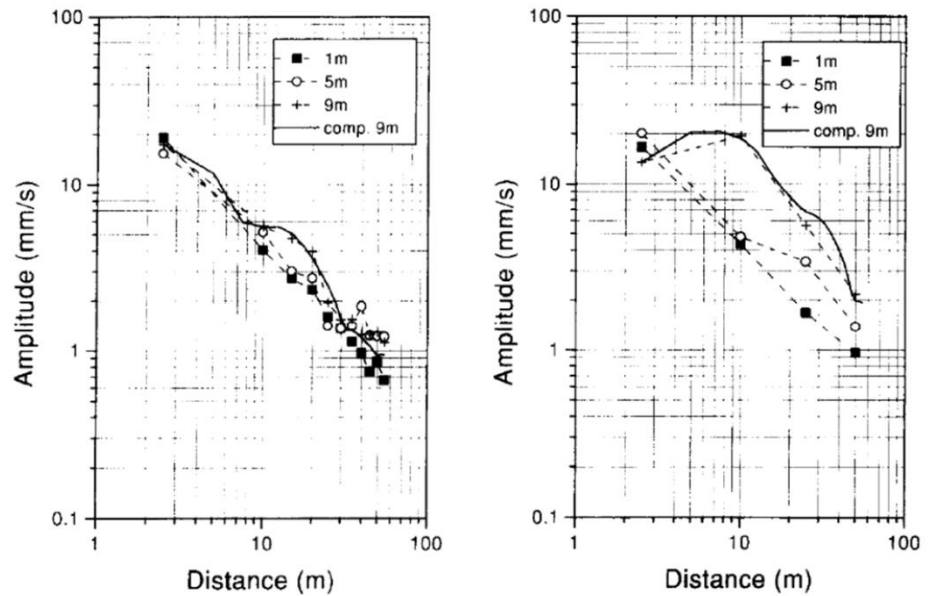
Figuur 8 en Figuur 9 geven resultaten uit [Staalduinen et al., 1991b] voor maximale trillingsniveaus in verticale en horizontale richting, gemeten bij heiwerkzaamheden op verschillende afstanden in een kleigrond. Om betrouwbare voorspellingen te kunnen doen, specificeren [Staalduinen et al., 1991b] een gefitte lijn met een overschrijdingskans van 50% (het gemiddelde) en een lijn met een overschrijdingskans van 5%. Figuur 10 geeft resultaten van [Jongmans, 1996] gemeten op een zandgrond. Hierin valt op hoe er voor de horizontale trillingscomponent een duidelijke invloed van de diepte waarop de paal zich bevindt waarneembaar is. Voor een diepte van 9 meter worden de grootste amplitudes op ongeveer 10 meter van de trilbron gevonden. Dit bleek het gevolg van interferentie tussen drukgolven en oppervlaktgolven.



Figuur 8 Afname in snelheid in verticale richting met afstand aan het oppervlak voor heiwerkzaamheden in een kleigrond [Staalduinen et al., 1991b].



Figuur 9 Afname in snelheid in horizontale richting met afstand aan het oppervlak voor heiwerkzaamheden in een kleigrond, uit [Staalduinen et al., 1991b].

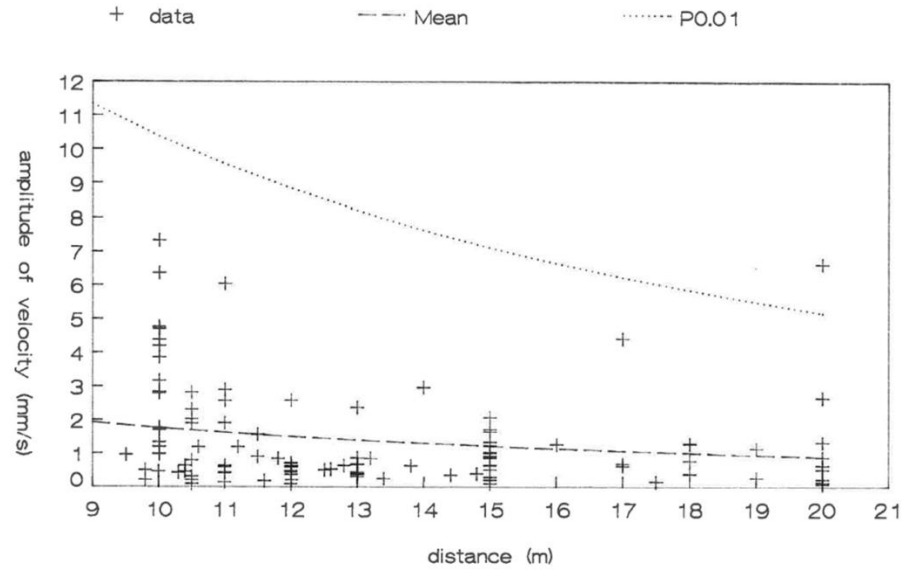


Figuur 10 Afname in snelheid met afstand aan het oppervlak voor heiwerkzaamheden in een zandgrond, uit [Jongmans, 1996]: (links) verticale trillingen, (rechts) radiale trillingen.

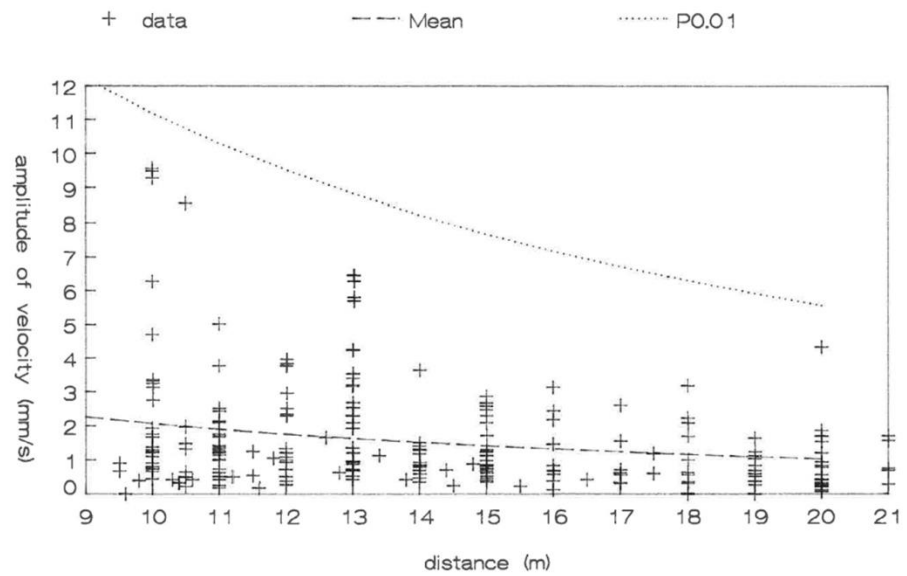
Figuur 11 en Figuur 12 geven resultaten uit [Staalduinen et al., 1991b] voor maximale trillingsniveaus in verticale en horizontale richting, gemeten bij het intrillen van damwanden op verschillende afstanden in zand- en kleigrond.

Een probleem van de gefitte modellen in Figuur 11 en Figuur 12 is de beperkte afstand waarover ze gefit zijn. Dit zorgt vooral voor grote onzekerheid in de dempingswaarden n en a die zijn berekend. Figuur 13 geeft resultaten van [Athanasopoulos en Pelekis, 2000] over een grotere range aan afstanden.

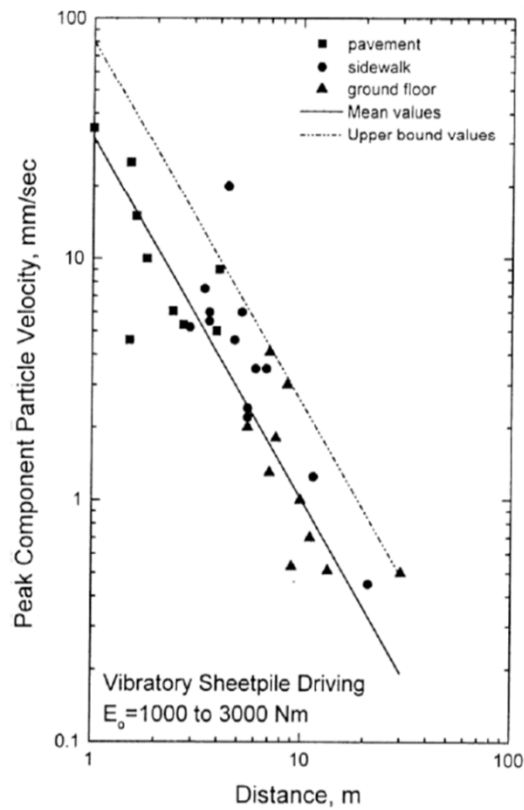
Binnen de range aan afstanden waar [Staalduinen et al., 1991b] resultaten presenteert is er een redelijke overeenkomst. De bepaalde dempingswaarden uit [Athanasopoulos en Pelekis, 2000] geven dus ook een representatief beeld voor de metingen uit [Staalduinen et al., 1991b].



Figuur 11 Afname in snelheid in verticale richting met afstand aan het oppervlak voor het intrillen van damwanden in een zand- en kleigrond, uit [Staalduinen et al., 1991].



Figuur 12 Afname in snelheid in horizontale richting met afstand aan het oppervlak voor het intrillen van damwanden in een zand- en kleigrond, uit [Staalduinen et al., 1991].



Figuur 13 Afname in snelheid in verticale richting met afstand aan het oppervlak voor het intrillen van damwanden [Athanasopoulos en Pelekis, 2000].

Tabel 5 geeft een overzicht van de referentie trillingsamplitude u_o (waarde op referentieafstand $x_o = 5$ m), en de geometrische en materiaal dempingswaarden n en a bepaald voor heien en trillen op basis van verschillende studies.

Tabel 5 Overzicht modelwaarden voor heien en trillen van damwanden bepaald uit verschillende literatuurbronnen (referentieafstand $x_o = 5$ m).

Referentie	Bodemprofiel	n (-)	u_o (mm/s)		a (1/m)	
			Ver.	Hor.	Ver.	Hor.
<i>Heien</i>						
Staalduinen et al. (1991b)	Klei	1	6	10	0,01	0
Whyley and Sarsby (1992)	Klei	1	7	-	0	-
Jongmans (1996)	Zand	1	10	9	0	0
<i>Trillen</i>						
Athanasopoulos en Pelekis (2000)	Klei/Zand	1	3	-	0,03	-
Staalduinen et al. (1991b)	Klei/Zand	0,5	3,1	3,5	0,035	0,035

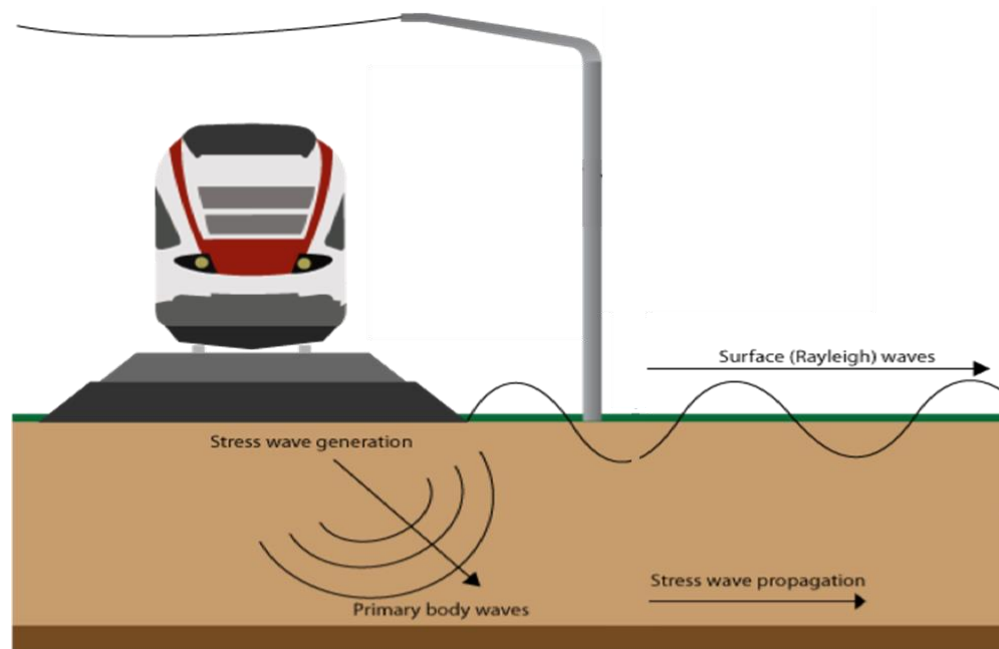
2.3.2 Verkeer

Bronbeschrijving

Rail- en wegverkeer leiden tot een dynamische belasting van de bodem en daardoor tot trillingen in de omgeving. De trillingen ontstaan onder meer door [Staalduinen en Smits, 1993]:

- De passage van een reeks statische belastingen;
- Geometrische afwijkingen in het spoor of de weg;
- Excentriciteit en onbalans in de wielen of wielstellen;
- Responsie in de vrijheidsgraden van het materieel.

Figuur 14 geeft een schematische weergave van de verschillende golven tijdens een treinpassage, voor wegverkeer ziet het schematische golfpatroon er hetzelfde uit. Druk- en schuifgolven breiden zich bolvormig uit vanaf de bron die zich in een rechte lijn verplaatst. Rayleighgolven breiden zich langs het maaiveld uit vanaf de trillingsbron en hebben zowel een horizontale als een verticale component.



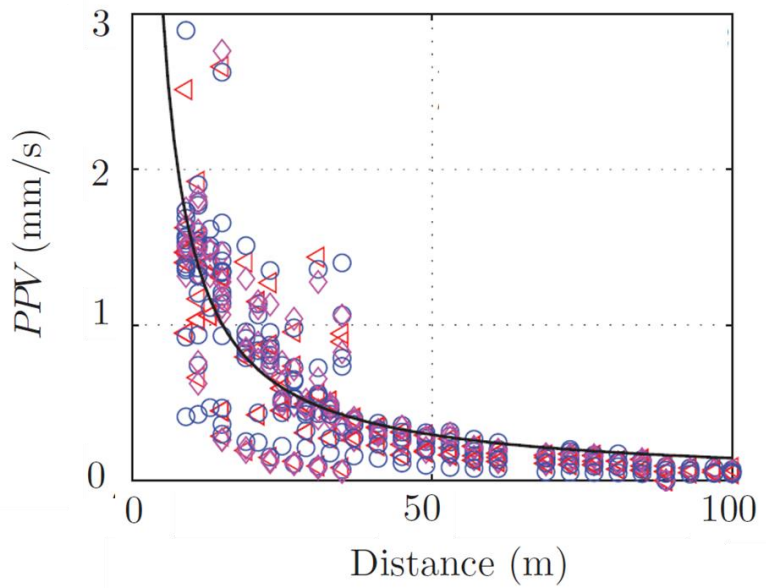
Figuur 14 Schematische weergave van de golfpatronen die gegenereerd worden bij een treinpassage, aangepaste illustratie van [Edinburgh, 2016].

Trillingskarakteristieken

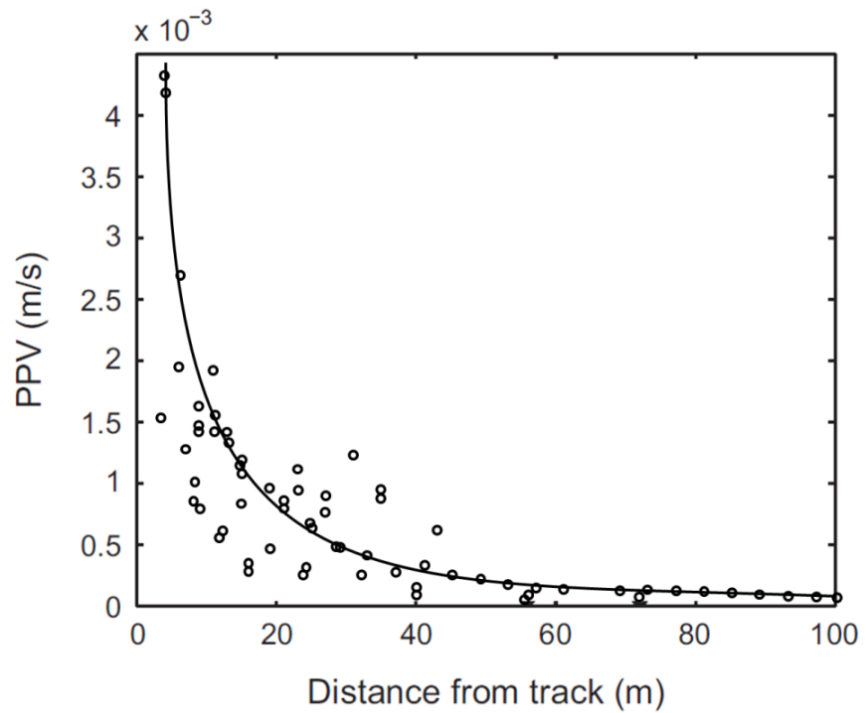
Zowel bij trein- als wegverkeer is er sprake van herhaald kortdurende trillingen. Voor treinverkeer ligt de dominante frequentie over het algemeen tussen de 5 en 12.5 Hz [Suhairi, 2000]. Voor wegverkeer ligt het grootste deel van de trillingsenergie tussen de 5 en 20 Hz, over het algemeen ligt de dominante frequentie rond de 10 Hz [Staalduinen en Smits, 1993].

Figuur 15 en Figuur 16 presenteren resultaten voor de snelheidsniveaus op verschillende afstanden van een hogesnelheidslijn uit studies door [Kouroussis, 2014] en [Connolly et al., 2014].

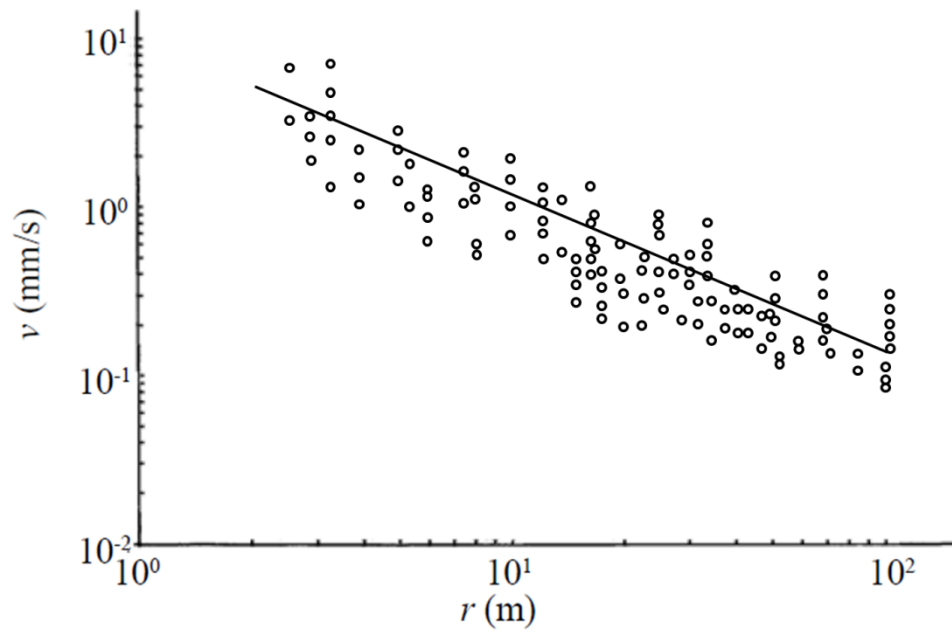
Resultaten van [Auersch en Said, 2014] voor normaal treinverkeer en wegverkeer over een snelweg zijn weergegeven in Figuur 17 en Figuur 18.



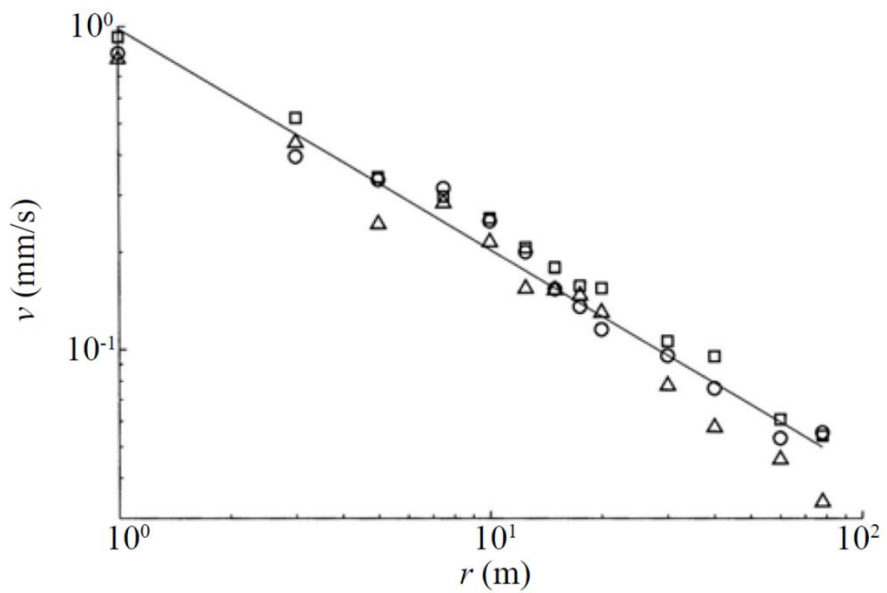
Figuur 15 Afname in versnelling met afstand aan het oppervlak nabij hogesnelheidslijnen (data voor Thalys, Eurostar en TGV passages), uit [Kouroussis, 2014].



Figuur 16 Afname in versnelling met afstand aan het oppervlak nabij hogesnelheidslijnen (data voor Mons 2012 en Degrande passages), resultaten afkomstig uit [Connolly et al., 2014].



Figuur 17 Afname in versnelling met afstand aan het oppervlak voor normale treinen, resultaten afkomstig uit [Auersch en Said, 2014].



Figuur 18 Afname in versnelling met afstand aan het oppervlak voor wegverkeer (nabij een snelweg), uit [Auersch en Said, 2014].

Tabel 6 geeft een overzicht van de referentie trillingsamplitude u_o , en de geometrische en materiaal dempingswaarden n en a bepaald voor trein- en wegverkeer op basis van de resultaten uit de verschillende studies.

Tabel 6 Overzicht modelwaarden voor trein- en wegverkeer bepaald uit verschillende literatuurbronnen (referentieafstand $x_o = 5$ m).

Referentie	n (-)	u_o (mm/s)		a (1/m)	
		Ver.	Hor.	Ver.	Hor.
<i>Trein</i>					
Connolly et al. (2014)	1	3	-	0	-
Kouroussis (2010)	1	3	-	0	-
Auersch en Said (2010)	1	2	-	0	-
<i>Weg</i>					
Auersch en Said (2010)	0,5	1,5	-	0,01	-

2.4 Rekenmodel trillingsniveau in een ontsteker

[CUR 166, 1997] geeft een rekenmodel voor de bepaling van trillingen in een gebouw ten gevolge van heien of het trillen van damwanden. Hetzelfde model kan worden gebruikt om het trillingsniveau in een ontsteker te bepalen ten gevolge van een trillingsbron in de omgeving. Het trillingsniveau in de ontsteker wordt bepaald met de volgende componenten:

1. Bronsterkte, te kenmerken door een trillingsintensiteit van de bodem op zekere afstand (x_o) van de bron, u_o in mm/s. Voor deze afstand wordt $x_o = 5$ m aangehouden;
2. De trillingsoverdracht door de bodem, weergegeven door een dimensie loze overdrachtsfactor C_{ox} ;
3. De trillingsoverdracht van de bodem naar de ontsteker, weergegeven door een dimensie loze overdrachtsfactor C_{xd} .

Omdat de parameters in het rekenmodel zo goed mogelijk aan waarnemingen in de praktijk zijn gefit en er een behoorlijke spreiding aanwezig is in deze waarnemingen, is er ook spreiding ten opzichte van de berekende resultaten te verwachten. De spreiding in de bronsterkte is expliciet gemaakt in de berekening met behulp van een kansverdelingsfunctie γ , een variatiecoëfficiënt V_o , en een betrouwbaarheidsindex β .

2.4.1 Bronsterkte (u_o)

Op basis van de waarden beschreven in de voorgaande secties (Tabel 5 en Tabel 6) is een keuze gemaakt voor u_o , afhankelijk van type trilbron en grondtype. Tabel 7 geeft deze waarden. Daarnaast specificeert Tabel 7 waarden voor de variatiecoëfficiënt V_o . Voor heien en trillen zijn deze bepaald op basis van [Staalduinen et al., 1991b]. De variatiecoëfficiënt voor treinverkeer is bepaald met behulp van de bandbreedte in Figuur 17. Voor wegverkeer is eenzelfde waarde aangenomen. De bronsterkte met een bepaalde kans van overschrijding kan nu worden bepaald met:

$$u_{o,\beta} = u_o e^{0,7\beta V_o} \quad [3]$$

De betrouwbaarheidsindex β bepaald de kans op overschrijding, zoals gespecificeerd in Tabel 8.

Tabel 7 Overzicht waarden voor de gemiddelde bronsterkte en de spreiding voor verschillende trilbronnen (referentieafstand $x_0 = 5$ m).

Trilbron	Bodemprofiel	u_0 (mm/s)		V_0 (-)	
		Ver.	Hor.	Ver.	Hor.
Heien	Zand	10	9	0,6	0,6
	Klei	7	10	0,6	0,6
Trillen	-	3,1	3,5	1,1	1,1
Treinverkeer	-	3	-	0,6	-
Wegverkeer	-	1,5	-	0,6	-

Tabel 8 Betrouwbaarheidsindex, [Staalduinen en Smit, 1991].

Kans op overschrijding	Betrouwbaarheidsindex β
0,5	0
0,1	1,18
0,05	1,64
0,01	2,32
0,005	2,57
0,001	3,09

2.4.2 *Overdracht door de bodem (C_{ox})*

Onder de aanname dat de afname in de topwaarden van de trillingssnelheid met afstand wordt veroorzaakt door geometrische demping en materiaaldemping, is de overdracht door de bodem te beschrijven met:

$$C_{ox} = (x_0/x)^n e^{-a(x-x_0)} \tag{4}$$

Hierin is x_0 de referentie afstand, deze wordt op 5 m genomen. De afstand x is de afstand tussen de trilbron en een bepaald vanaf de bron. De waarden voor de geometrische demping n en materiaaldemping a zijn gespecificeerd in Tabel 9.

Tabel 9 Overzicht waarden voor de bronsterkte en de spreiding voor verschillende trilbronnen.

Trilbron	n (-)		a (1/m)	
	Ver.	Hor.	Ver.	Hor.
Heien	1	1	0	0
Trillen	1	1	0,03	0,03
Treinverkeer	1	-	0	-
Wegverkeer	0,5	-	0,01	-

2.4.3 *Overdracht van de bodem naar de ontsteker (C_{xd})*

De overdracht van trillingen van bodem naar ontsteker, wordt bepaald door de mate waarin de bom de trillingen overdraagt. Omdat er niets bekend is over deze overdrachtskarakteristieken, zijn er metingen uitgevoerd. Met deze metingen is een afchatting te maken van de overdracht van de bodem naar de ontsteker C_{xd} .

2.4.4 *Rekenvoorbeeld*

Inbrengen van een heipaal op 6 m vanaf een blindganger in een kleigrond, met een overschrijdskans van de bronsterkte van 5%.

Verticaal:

$$u_0 = 7 \text{ mm/s}$$

$$x_0 = 5 \text{ m}$$

$$x = 6 \text{ m}$$

$$V_0 = 0,6$$

$$n = 1$$

$$a = 0 \text{ m}^{-1}$$

$$\beta = 1,64$$

Met deze waarden volgt:

$$u_{0,\beta} = u_0 e^{0,7\beta V_0} = 7 \cdot e^{0,7 \cdot 1,64 \cdot 0,6} = 13,9 \text{ mm/s}$$

$$C_{ox} = (x_0/x)^n e^{-a(x-x_0)} = (5/6)^1 e^{-0(6-5)} = 0,83$$

Dus het verticale trillingsniveau op 10 meter afstand in de grond is:

$$u_{x,\beta} = u_{0,\beta} \cdot C_{ox} = 13,9 \cdot 0,83 = 11,6 \text{ mm/s.}$$

Horizontaal:

$$u_0 = 10 \text{ mm/s}$$

$$x_0 = 5 \text{ m}$$

$$x = 6 \text{ m}$$

$$V_0 = 0,6$$

$$n = 1$$

$$a = 0 \text{ m}^{-1}$$

$$\beta = 1,64$$

Met deze waarden volgt:

$$u_{0,\beta} = u_0 e^{0,7\beta V_0} = 10 \cdot e^{0,7 \cdot 1,64 \cdot 0,6} = 19,9 \text{ mm/s}$$

$$C_{ox} = (x_0/x)^n e^{-a(x-x_0)} = (5/6)^1 e^{-0(6-5)} = 0,83$$

Dus het horizontale trillingsniveau op 10 meter afstand in de grond is:

$$u_{x,\beta} = u_{0,\beta} \cdot C_{ox} = 19,9 \cdot 0,83 = 16,6 \text{ mm/s.}$$

Als we aannemen dat de overdracht van de bodem naar de ontsteker C_{xd} gelijk is aan 1, dan zijn de trillingsniveaus in de ontsteker gelijk aan $u_{x,\beta}$.

Met behulp van de trillingsniveaus die volgen uit triltafel metingen op de verschillende type ontstekers kan worden bepaald of er veilig kan worden geheid op 6 m afstand. Met behulp van deze metingen en bovenstaande formules kan ook worden bepaald tot welke afstand de verschillende trillingen nog gegenereerd kunnen worden.

3 Beschrijving testopstelling

De Gemeente Rotterdam heeft twee proeflocaties ter beschikking gesteld⁴; een locatie met een klei ondergrond en een locatie met zandige ondergrond. De bom is beschikbaar gesteld door de EODD. Een dummy ontsteker, versnellingsopnemer en data acquisitie apparatuur zijn aangeleverd door TNO. Grondverzet is uitgevoerd door het bedrijf van den Herik. Voor het genereren van trillingen is gebruik gemaakt van een excitator van de Gemeente Rotterdam. In de volgende paragrafen worden de locaties, bom en ontsteker, trilbron, versnellingsopnemers, test configuraties en data acquisitie nader beschreven.

3.1 Locaties

Testen zijn uitgevoerd in een kleiachtige grond en in een zandgrond om de invloed van verschillende grondeigenschappen mee te nemen in het onderzoek. Achtergebleven Conventionele Explosieven (CE) zijn voor een belangrijk deel terug te leiden op een ondergrond bestaande uit klei. De Rotterdamse ondergrond (het zogenaamde Rotterdams bodemprofiel) is representatief voor een ondergrond uit klei en een logische locatiekeuze om een proef uit te voeren. De locatie die gebruikt is voor het Rotterdams bodemprofiel betreft het park Zestienhoven. Hierbij is rekening gehouden met de geschiktheid van de grondopbouw, bereikbaarheid van de locatie en enigszins afgelegen ligging ten opzichte van versturende invloeden op de meting.

Een zandige ondergrond is aanwezig bij andere locaties waar CE zijn aangetroffen. Om praktische redenen is besloten om een proef in zandgrond nabij Rotterdam uit te voeren. Hiervoor is een locatie op de Kop van de Beer (Tweede Maasvlakte) gevonden [Zandbergen, 2014].

Figuur 19 en Figuur 20 geven respectievelijk de locaties weer in de buurt van vliegveld Zestienhoven en op de Kop van de Beer. Conform sonderingsgegevens voor de locaties EF290, EF304 en EF340 in Figuur 19 is het grondwaterpeil circa 1.5 m beneden maaiveld voor de locatie Zestienhoven. Voor de locatie Kop van de Beer staat het grondwater op circa 4.8 m beneden maaiveld. Het bodemprofiel voor de locatie Zestienhoven en de sonderingsprofielen van beide locatie zijn weergegeven in Appendix A.

Figuur 21 geeft een impressie van de werkzaamheden voorafgaand aan de meting op de locatie Zestienhoven. Voor de Kop van de Beer zijn dezelfde procedures gevolgd, zie Figuur 22. Voor de metingen is een versnellingsopnemer op een dummy ontsteker bevestigd die in de neus van de bom is geschroefd. Op de locatie Zestienhoven bevindt de bom zich in verticale positie met de neus omhoog en met de neus ongeveer 1 m onder maaiveld, waardoor de onderzijde van de bom zich in het grondwater bevindt. Op de locatie Kop van de Beer bevindt de bom zich in horizontale positie met de neus op ongeveer 1.5 m onder maaiveld, dus ruim boven grondwaterniveau. Er wordt geen directe invloed van het grondwater verwacht op de metingen (zie paragraaf 2.2.2).

Tussen plaatsing van de bom en het uitvoeren van de trillingsmetingen is tijd gereserveerd om de grond enigszins te laten verdichten/inklinken om de mogelijke verstoring van de metingen door het grondverzet te verkleinen.

⁴ Conform overleg tussen TNO en Gemeente Rotterdam te Rotterdam op 18-08-2014.

Voor de locatie Zestienhoven was dit 5 weken, voor de locatie Kop van de Beer was dit 3 weken. Deze periodes zijn (meer dan) voldoende voor wat betreft de primaire zetting. Dit is de zetting ten gevolge van elastische vervorming en het uittreden van water uit de poriën. De secundaire zetting, die ontstaat ten gevolge van kruip van het korrelskelet, gaat gemoeid met veel langere periodes. Dit kruipproces duurt in de orde van jaren. Ter compensatie is verdichting verkregen door de grond aan te drukken met behulp van de graafmachine. Er wordt geen invloed van de verdichting van de grond verwacht op de te bepalen verhoudingsfactor (hoofdstuk 4) omdat de versnellingsopnemers in dezelfde grondlaag liggen.



Figuur 19 Locatie Rotterdams bodemprofiel te Rotterdam park Zestienhoven [Zandbergen, 2014].



Figuur 20 Locatie zandopbouw op de Kop van de Beer [Zandbergen, 2014].



Figuur 21 Locatie Zestienhoven: grondverzet (linksboven); plaatsing bom verticaal (rechtsboven); bevestigen versnellingsopnemer op dummy ontsteker (rechtsmidden); indraaien dummy ontsteker in neus fuze pocket (links 2^e van de boven); plaatsing versnellingsopnemers in behuizing naast het bomlichaam (rechtsonder); verdichten ("aanrupsen") van de grond (links 3^e van boven); afdekking met rijplaten (linksonder).



Figuur 22 Locatie Kop van de Beer: horizontale plaatsing bom en versnellingsopnemers in behuizing naast het bomlichaam (links- en rechtsboven); waterdichte sealing met kneedbaar rubber op de verbinding tussen bedrading in pvc leiding en het bomlichaam (rechtsmidden); plaatsbepaling en aanvoer van de excitator met bijbehorend aggregaat en aansturing (onder).

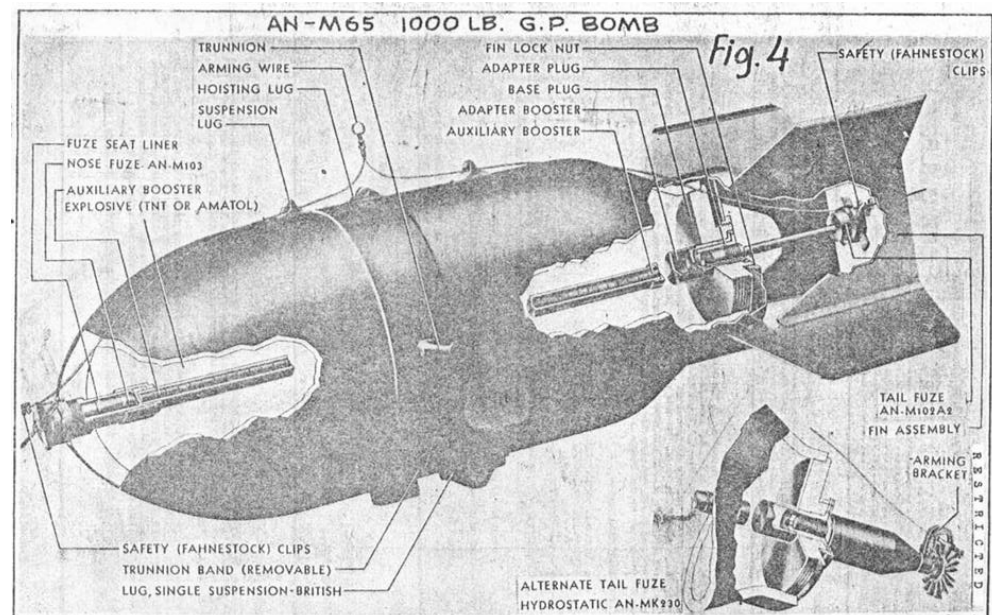
Tabel 10 geeft een samenvatting van de gegevens van beide locaties.

Tabel 10 Overzicht locatiegegevens.

Locatie	Coördinaten (Breedtegraad/Lengtegraad)	Grond type	Bom oriëntatie	Diepte versnellings opnemers in de bom [m]
Zestienhoven	51.94293° N / 4.43538° O	Klei	Verticaal (neus omhoog)	1
Kop van de Beer	51.969094° N / 4.096111° O (bij benadering)	Zand	Horizontaal	1.5

3.2 Bom en ontsteker

De voor het onderzoek gebruikte bom is een Amerikaanse Army-Navy (AN) 1000 lb General Purpose (GP) bom, zie Figuur 23. De bom is door de EODD aangeleverd inclusief springstof en exclusief ontstekers. Door monsternamen van de explosieve stof voorafgaand aan het trillingsonderzoek, is door TNO vastgesteld dat de explosieve lading bestaat uit AMATOL een menging van ammonium nitraat en TNT. De bijbehorende massa is 964 lbs (437 kg), waarvan 530 lbs AMATOL (240 kg). De lengte van de bom is 53.1" (1.35 m) en de diameter is 18.8" (0.48 m), zie Appendix B voor verdere details. Deze bom werd normaliter aan de voorzijde voorzien van een AN-M103 neusbuis impact ontsteker (zie ook figuur 16 in [Kroon, Bouma, van Ham, 2015]) en een AN-M102A2 staartbuis impact ontsteker. Bij aanvang van het project was een (inerte) AN-M103 ontsteker voorhanden bij de EODD in Soesterberg. Voor het trillingsonderzoek is deze door de TNO werkplaats gebruikt om een dummy ontsteker te maken met dezelfde schroefdraad, zie Figuur 24. Op deze manier werd compatibiliteit gegarandeerd met een (gedurende het project beschikbaar te komen) Amerikaanse vliegtuigbom.

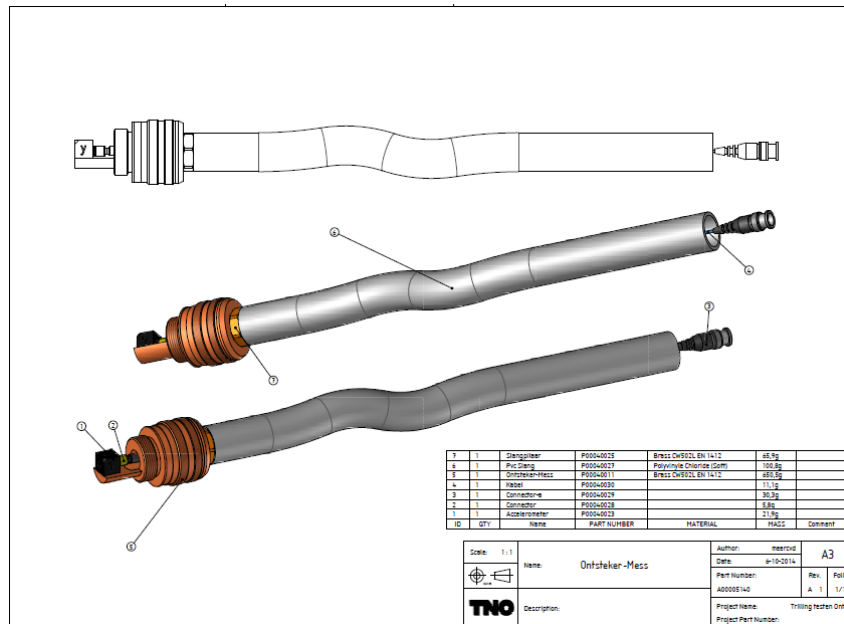


Figuur 23 US 1000 lb GP bom.



Figuur 24 Dummy ontsteker (links) en de AN-M103 ontsteker (rechts).

Op de locatie van de striker is een plateau aangebracht waarop de versnellingsopnemer is vastgeschroefd. Nadat de dummy ontsteker in de fuze pocket in de neus van de bom is gedraaid bevindt de opnemer zich in de bom en is daarmee afgeschermd van vocht. Aan de voorzijde van de dummy ontsteker is een dop gemaakt die de bedrading doorlaat naar de data acquisitie apparatuur aan het oppervlak. Ter bescherming van de bedrading wordt deze door een gewapende PVC buis geleid, zoals weergegeven in Figuur 25. De versnellingsopnemers die de trilling in de grond meten bevindt zich in een waterdichte behuizing. Dit kastje is naast de bom in de grond geplaatst zodanig dat de opnemers zich op dezelfde diepte onder het maaiveld bevinden als de opnemers in de neus van de bom. De bedrading van de opnemers in het kastje wordt ook door een gewapende PVC buis naar de data acquisitie apparatuur gevoerd.



Figuur 25 Dummy ontsteker met versnellingsopnemer en bedrading beschermd door een gewapende PVC slang.

3.3 Trilbron

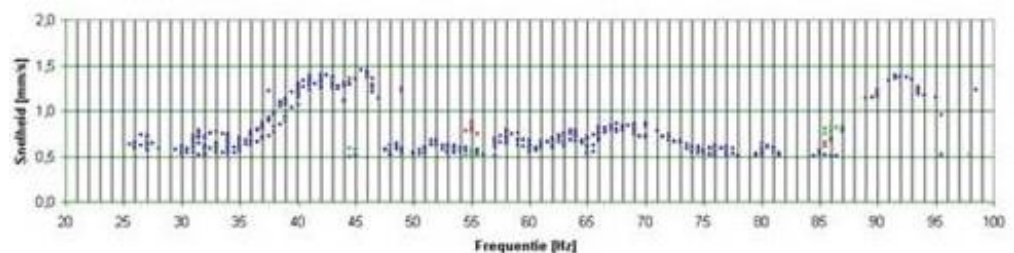
In hoofdstuk 2 is een overzicht gegeven van de kennis en data beschikbaar over het verplaatsen van trillingen in de bodem (horizontaal en verticaal) en ook over de optredende trillingen bij verschillende activiteiten / werkzaamheden. Hieruit blijkt dat brongegevens situatie specifiek en variabel zijn. Het gaat in dit onderzoek juist om de vraag hoe een bepaalde (bekende) trilling via het bodem / CE scheidingsvlak wordt overdragen aan en voortgezet in het bomlichaam en uiteindelijk de ontsteker bereikt. Vastgesteld is dat het daarom niet zinvol is om bij feitelijke werkzaamheden (bijvoorbeeld heien) te meten. In overleg met het Ingenieursbureau van de gemeente Rotterdam wordt aangenomen dat voor bepaling van de verhoudingsfactor tussen grond en bom, de trillingsbronnen kunnen worden nagebootst met een excitator aan het oppervlak.

Er zal worden gemeten met één proefopstelling. De proefopstelling bestaat kortweg uit één ingegraven bomlichaam en een excitator waarmee trillingssterkten bij verschillende frequenties kunnen worden opgewekt [VEO, 2014].

De excitator van de gemeente Rotterdam die voor dit onderzoeksproject is gebruikt, is afgebeeld in Figuur 26. Deze trilplaat genereert een amplitude van 0,5 tot 2,0 mm/s over het frequentiebereik van 6 – 87 Hz, zoals geïllustreerd in Figuur 27 vanaf 25 Hz. Laagfrequente trillingsbronnen met een frequentie onder de 6 Hz kunnen niet volledig worden gegenereerd met de excitator.



Figuur 26 Excitator van de gemeente Rotterdam met versnellingsopnemers op maaiveld links van de trilplaat.



Figuur 27 Snelheid als functie van frequentie van de excitator van de gemeente Rotterdam.

3.4 Versnellingsopnemers

Figuur 28 illustreert de versnellingsopnemers die zijn toegepast voor de metingen. Op de dummy ontsteker is een drie richtingen component ICP versnellingsopnemer aangebracht van PCB⁵. Nabij de bom en de trilplaat is gebruik gemaakt van een Sundstrand versnellingsopnemer voor elke richtingscomponent. In totaal zijn er dus drie Sundstrand opnemers in de grond en drie op maaiveld nabij de trilplaat gebruikt. Alle sensoren zijn gekalibreerd voor iedere meting, zie Appendix E.



Figuur 28 Versnellingsopnemers toegepast voor de metingen: 3-component ICP opnemer op de dummy ontsteker (links) en drie Sundstrand opnemers met bekabeling nabij de excitator (rechts).

3.5 Test configuraties

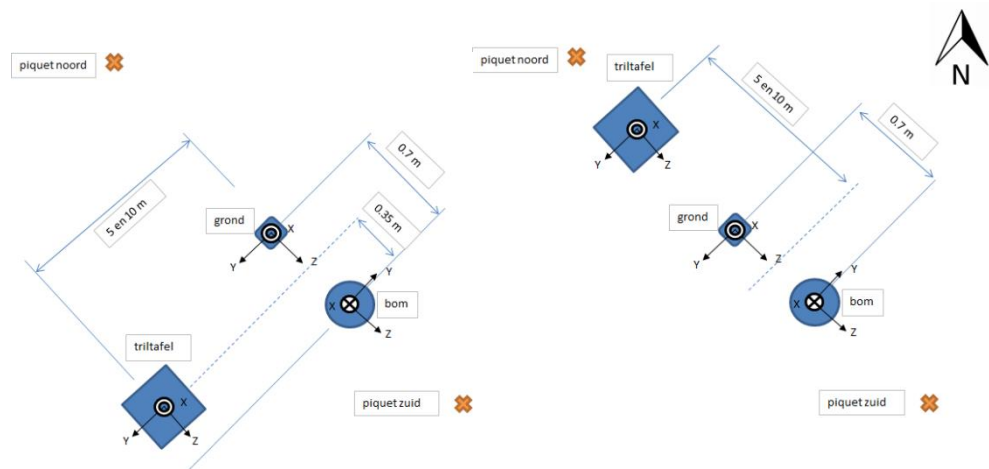
Figuur 29 en Figuur 30 geven de test configuraties weer voor de locatie Zestienhoven en Kop van de Beer met de gebruikte assenstelsels tijdens de metingen. Vanwege mogelijke variabiliteit die typisch voorkomt bij grondmetingen (zie paragraaf 2.3) is ervoor gekozen om de metingen in twee aanstootrichtingen uit te voeren; in lijn met en haaks op de lijn tussen de opnemers in de bom en in de grond.

Markeringen zijn aangebracht op de dummy ontsteker, zie Figuur 24 (links), voordat deze in de bom is gedraaid. Deze markeringen garanderen een correcte uitlijning van het assenstelsel van de versnellingsopnemer op de ontsteker met het assenstelsel van de opnemers in het kastje in de grond. Voor de analyse is alle data naar hetzelfde assenstelsel omgerekend, dit is het assenstelsel dat is weergegeven op de bom in de Kop van de Beer meting: de Z-component omhoog, de X-component horizontaal in lijn met de grondsensoren, de Y-component wijzend naar het Westen.

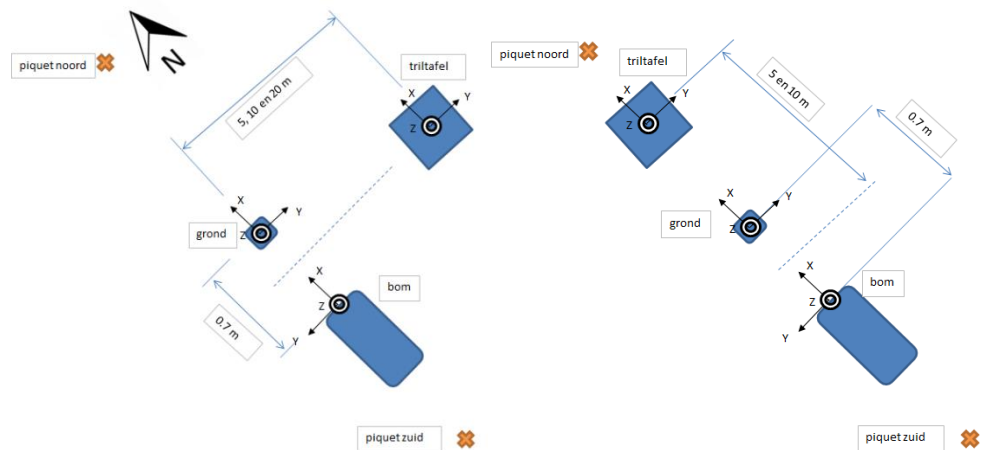
Voor beide locaties is de horizontale afstand +/- 70 cm tussen de versnellingsopnemer in de bom en in het kastje in de grond. Voor deze afstand wordt geen invloed van de aanwezigheid van de bom op de versnellingsopnemers in de grond verwacht.

⁵ PCB, Triaxial ICP® Accel., ~500 mV/g, 50 g, 0.5 Hz to 3 kHz.

In Figuur 29 wordt de bom gepresenteerd in verticale positie met de neus omhooggericht, in Figuur 30 wordt de bom gepresenteerd in horizontale positie met de neus richting het kastje in de grond.



Figuur 29 Configuratie opstellingen Zestienhoven met 90° (links) en 0° (rechts) aanstootrichting.



Figuur 30 Configuratie opstellingen Kop van de Beer met 90° (links) en 0° (rechts) aanstootrichting.

In Figuur 29 (Zestienhoven) zijn arbitrair gekozen afstanden weergegeven van 5 en 10 m gemeten vanaf de excitator tot aan de trillingsopnemers in de bom en in de grond. Deze afstanden zijn gebruikt voor de aanstootrichtingen 0 en 90°, respectievelijk in lijn met en haaks op de lijn tussen de opnemers in de bom en in de grond. Op de meetdag was er voor de Kop van de Beer (Figuur 30) tijd beschikbaar voor een extra meting op 20 m afstand in de 90° aanstootrichting. Deze extra meting is uitgevoerd om een beter beeld te krijgen van de afstand op de verhouding tussen de trilling in de bom en in de grond. Voor een afstand van meer dan 20 m is de verwachting dat de trilling te zwak wordt om te kunnen meten. Er zijn metingen uitgevoerd bij frequenties tussen 4 en 60 Hz. Naderhand bleek dat de triltafel pas vanaf 10 Hz voldoende trillingsniveau produceerde voor betrouwbare resultaten. De metingen uitgevoerd bij frequenties van 8 Hz en lager zijn gebruikt om het achtergrond trillingsniveau te bepalen tussen 10 en 60 Hz.

De 0 en 90° aanstootrichtingen worden geïllustreerd in Figuur 31 en Figuur 32 voor respectievelijk de locatie Zestienhoven en Kop van de Beer.



Figuur 31 Trillingsmeting Zestienhoven; de excitator staat op een afstand van 5 m en in lijn met versnellingsopnemers in de bom en in de grond (gemarkeerd met de oranje/witte paaltjes op de achtergrond).



Figuur 32 Trillingsmeting Kop van de Beer; de excitator staat op een afstand van 5 m en onder een hoek van 90° ten opzichte van de lijn met versnellingsopnemers in de bom en in de grond (gemarkeerd met de oranje/witte paaltjes op de voorgrond).

3.6 Data acquisitie

Figuur 33 toont het data acquisitie systeem. De spanningssignalen zijn geregistreerd met een sample frequentie van 2000 Hz voor een periode van 50 seconden per meting. Per meting is de versterkingsfactor (gain) van de sensoren zo gekozen dat de signaal-ruis verhouding zo hoog mogelijk was. De omrekening van voltage naar versnelling is uitgevoerd in de nabewerking van de data.



Figuur 33 Data acquisitie systeem: DAQ voor de ICP en Sundstrand sensoren (boven), computer waarmee de bemonsterde versnellingsignalen worden gemonitord (onder).

4 Verhouding trilling in grond en bom

Voor de bepaling van de verhouding tussen trilling ter plaatse van de ontsteker in de bom en in de grond zijn in totaal 425 metingen uitgevoerd. Elke meting omvat een versnellings-, coherentie-, fase- en overdrachtsspectrum als functie van de aanstootfrequentie van de trilplaat. Deze spectra worden als volgt geduid:

- Het versnellingspectrum geeft inzicht in de opgetreden trillingsniveaus; de vergelijking van het versnellingspectrum met het spectrum van het achtergrondniveau geeft een indicatie van de signaal-ruis verhouding.
- Het coherentiespectrum is een maat voor de betrouwbaarheid van het resultaat; is er sprake van een lineaire relatie tussen de trillingen dan is de coherentie 1.
- Het fasespectrum wordt gebruikt voor de bepaling van de golfsnelheid en geeft inzicht in de betrouwbaarheid van de metingen; als de snelheid binnen de verwachte range voor de gestelde grondtypen valt, geeft dit vertrouwen in de resultaten uit de metingen.
- Het overdrachtsspectrum geeft inzicht in de mate van demping van de grond; de gevonden waarden stemmen overeen met wat typisch wordt gevonden in de literatuur.

Op basis van de overdrachten is de verhouding bepaald tussen de trilling in de grond en de trilling in de bom.

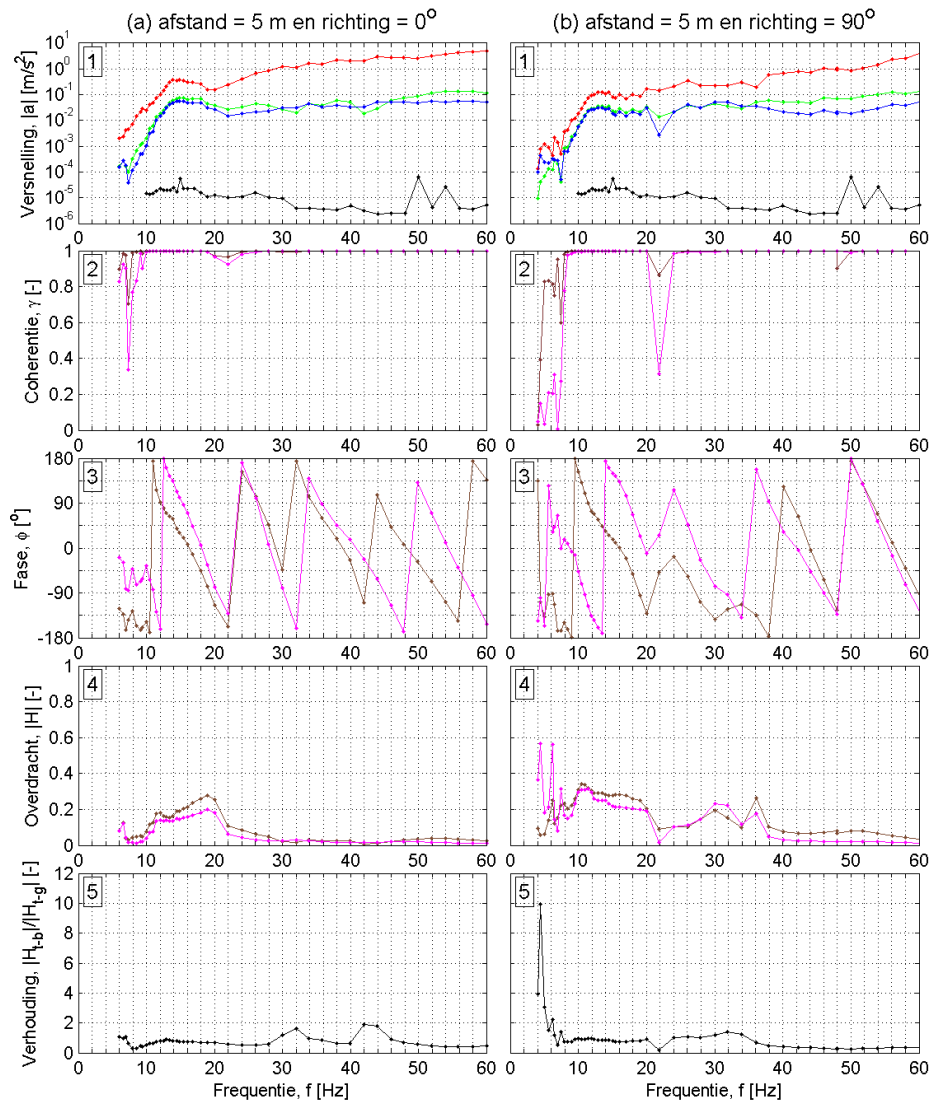
Voor de analyse is gebruik gemaakt van de dataverwerking zoals beschreven in Appendix C. Appendix D geeft de resultaten van alle metingen die zijn uitgevoerd in Zestienhoven en op de Kop van de Beer. Paragraaf 4.1 geeft ter illustratie een analyse van de gemeten waarden voor de Z-component van de veldmetingen in Zestienhoven. Vanwege de verticale ligging is dit waarschijnlijk de meeste kritische richting voor het ontstekingsmechanisme omdat de zwaartekracht meewerkt in de trillingsrichting en er minder wrijving is tussen slagpin en de behuizing (dan in horizontale positie). Met behulp van het versnellingspectrum, en coherentiespectrum is bepaald welke verhoudingsgetallen betrouwbaar zijn. De fase informatie is gebruikt om een afschatting te maken van de golfvoortplantingssnelheid. Typische golfsnelheden aan het oppervlakte van de grond variëren tussen de 40 en 500 m/s afhankelijk van het grondtype (zie Tabel 1 voor een meer precieze specificatie per grondtype). Over het algemeen geldt, hoe zachter de grond hoe lager de golfvoortplantingssnelheid. Paragraaf 4.2 geeft de waargenomen verhoudingsfactoren per richtingscomponent, afstand tussen trilbron en bom, grondtype en frequentiebereik. Een verhoudingsfactor van 1 geeft aan dat de overdracht van de trilling van de trilbron naar de ontsteker in de bom vergelijkbaar is met de overdracht van de trilbron naar de grond. Een verhoudingsfactor groter dan 1 betekent dat de overdracht naar het ontstekingsmechanisme groter is dan die naar de grond. Op basis van de resultaten zijn voor 4 frequentiebanden (10 – 20 Hz, 20 – 30 Hz, 30 – 40 Hz en 40 – 60 Hz) waarden voor de verhoudingsfactor bepaald. Hierbij is ervan uitgegaan dat deze waarde in een conservatieve (veilige) inschatting van de verhoudingsfactor in de gehele frequentieband moet resulteren.

4.1 Analyse

Figuur 34 en Figuur 35 geven de resultaten voor de Z-component met de trilplaat op 5 en 10 meter afstand van het meetpunt in de grond en in de bom. De bovenste grafieken in Figuur 34 en Figuur 35 presenteren de absolute versnelling $|a(f)|$ per aanstootfrequentie f . Uit deze grafieken is op te maken dat beneden 10 Hz het aanstootvermogen van de trilplaat snel afneemt en in de buurt komt van het achtergrondniveau. Beneden 10 Hz is het vermogen van de trilplaat niet afdoende om betrouwbare waarden voor de fase en overdracht af te leiden. De lagere coherentie waarden in dit frequentie bereik onderbouwen deze conclusie. Coherentie waarden kleiner dan 1 geven aan dat er geen sprake meer is van een lineaire relatie tussen de gemeten signalen. In dit geval zijn de bepaalde overdrachten en faseverschuivingen niet betrouwbaar. De ondergrens van 10 Hz is van toepassing voor alle testresultaten, in een aantal testen ligt deze grens iets hoger.

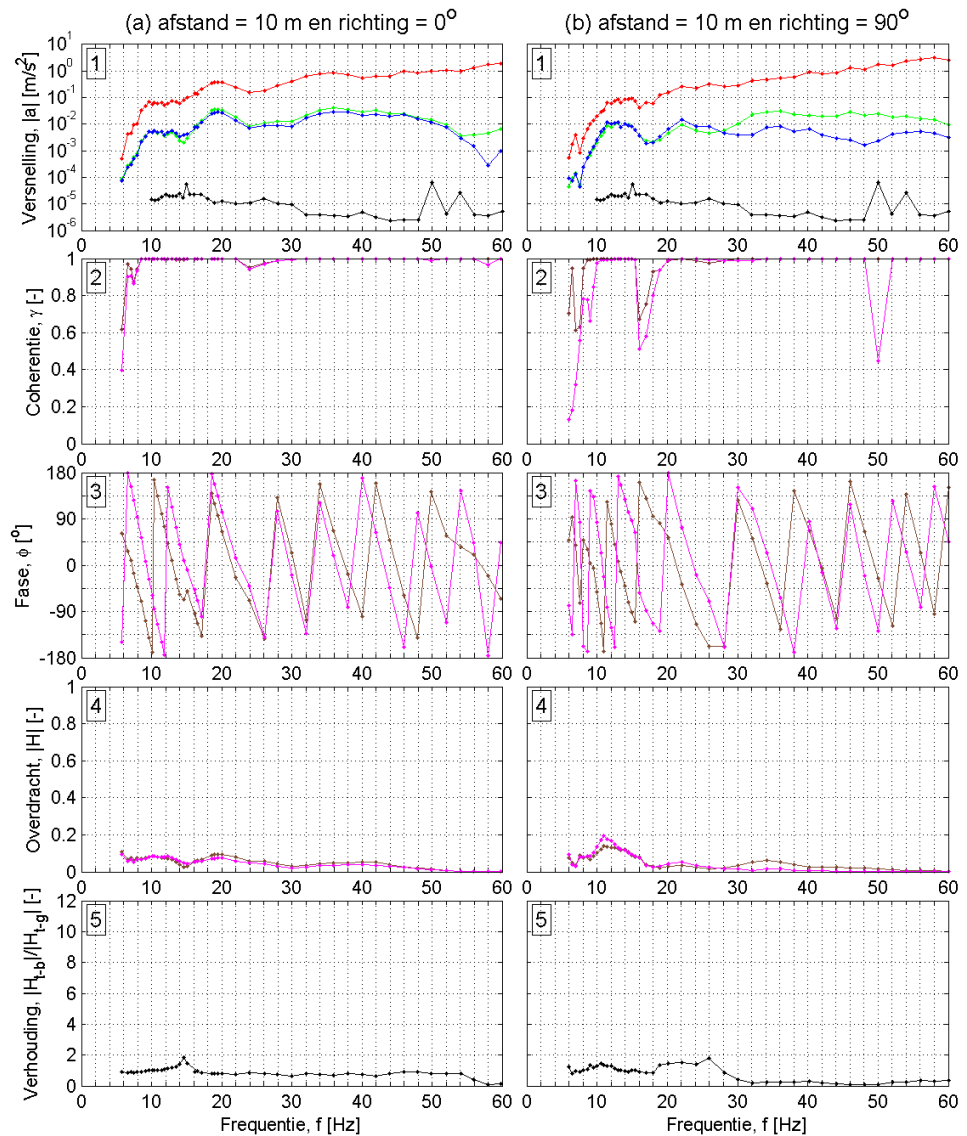
Boven 10 Hz zijn de signalen van de trilplaat twee ordes groter dan het achtergrondniveau. De piek zichtbaar in het achtergrondniveau bij 50 Hz is een storing ten gevolge van de netspanning.

Uit de fase verschuivingen in Figuur 34(a.3) en Figuur 34(b.3) volgen golfsnelheden tussen de 60 en 90 m/s voor 0° en rond de 60 m/s voor 90° aanstootrichting. De overdrachten trilplaat-grond en trilplaat-bom voor 0° aanstootrichting, te zien in Figuur 34(a.4), komen redelijk overeen. Figuur 34(a.5) laat zien dat tot een frequentie van 30 Hz de bom- en grondoverdracht vergelijkbaar zijn voor de 0° aanstootrichting. Van 30 tot 40 Hz zijn er voor beide aanstootrichtingen verhoudingsfactoren tot 1,7 bepaald. Voor de 30 – 40 Hz frequentieband is een verhoudingsfactor van 2 dus een veilige waarde. Voor 0° is de verhoudingsfactor 2 bij 42 en 44 Hz. Op basis hiervan wordt ook voor de 40 – 60 Hz frequentieband een verhoudingsfactor van 2 voorgesteld.



Figuur 34 Resultaten Zestienhoven Z-component met de trilplaat op 5 meter afstand: (a) aanstootrichting is 0° en (b) aanstootrichting is 90°.

Legenda: Figuren rij 1 -- trilbron, -- grond, -- bom, -- achtergrond
 Figuren rij 2 – 4 -- trilbron – grond, -- trilbron – bom



Figuur 35 Resultaten Zestienhoven Z-component met de trilplaat op 10 meter afstand: (a) aanstootrichting is 0° en (b) aanstootrichting is 90°.

Legenda: Figuren rij 1 -- trilbron, -- grond, -- bom, -- achtergrond
 Figuren rij 2 – 4 -- trilbron – grond, -- trilbron – bom

De resultaten met de trilplaat op 10 meter afstand zijn weergegeven in Figuur 35. Vanaf 10 Hz zijn de resultaten significant. De golfvoortplantingsnelheden voor 0° en 90° aanstootrichting liggen tussen de 70 en 100 m/s. De overdrachten voor beide aanstootrichtingen, weergegeven in Figuur 35(a.4) en (b.4) zijn voor het hele frequentiebereik kleiner dan 0,2. De verhoudingsfactor in Figuur 35(a.5) en (b.5) heeft voor het gehele frequentiebereik waarden gelijk of kleiner dan 2. Bij 15 Hz wordt de grootste verhoudingsfactor met een waarde 2 gevonden⁶.

⁶ De bandbreedte in de verhoudingsfactor is onderzocht voor 1 meting (Kop van de Beer, X-component, 5 m, 90°, 46 Hz). De verhouding tussen overdracht trilplaat-grond en trilplaat-bom voor deze meting was 6, met zeer kleine waarden voor de bepaalde overdrachten (< 0.05). De spreiding op deze verhoudingsfactor is kleiner dan 5%. De kleine magnitude van de overdrachten heeft dus geen invloed op de bepaalde verhoudingsfactor.

Voor frequenties hoger dan 30 Hz is de verhoudingsfactor gelijk aan 1 of kleiner. Voor 0° aanstootrichting is er één piekje waarneembaar in Figuur 35(a.5) bij 15 Hz. Daarom wordt voorgesteld om in de 10 – 20 Hz frequentieband een verhoudingsfactor van 2 toe te passen. Ook voor de 20 – 30 Hz frequentieband wordt een factor 2 voorgesteld, vanwege de verhoudingsgetallen bepaald voor de 90° aanstootrichting in deze range. Voor de frequentiebanden 30 – 40 en 40 – 60 Hz voldoet een verhoudingsfactor van 1.

4.2 Resultaat

Op basis van analyse van de resultaten in appendix C en uitgewerkt als beschreven in paragraaf 4.1, zijn verhoudingsgetallen tussen overdracht trilbron-bom en trilbron-grond bepaald voor vier frequentie bereiken die relevant zijn voor verkeer (5 – 20 Hz), heien (5 – 25 Hz), laagfrequent trillen van damplanken (20 – 25 Hz) en hoogfrequent trillen van damplanken (30 – 40 Hz) [Muller, 2007]. Hieraan toegevoegd zijn de metingen met een bereik van 40 – 60 Hz, aangeduid met “zeer hoog frequent trillen van damplanken”⁷.

Tabel 11 specificeert deze verhoudingsfactoren met onderscheid naar de richtingscomponent (X en Y horizontaal, Z verticaal), de afstand tussen trilplaat-bom, grondtype/bom oriëntatie. Tabel 11 maakt geen onderscheid naar aanstootrichting maar geeft de grootst gemeten factor weer. De tabel levert daarom een conservatieve benadering voor de verhouding tussen de trilling in de bom en in de grond voor de aanstootrichting met minder opslinging van het bomlichaam. De kritische aanstootrichting voor het ontstekingsmechanisme is waarschijnlijk in de richting van de as van de bom, aangezien de slagpin alleen in deze richting kan bewegen. In Tabel 11 is deze kritische richting in dikgedrukte rode cijfers weergegeven. Aangezien deze richting afhankelijk is van de oriëntatie van de bom (verticaal of horizontaal), verschilt deze richting voor de testen uitgevoerd in Zestienhoven (kleigrond) en de Kop van de Beer (zandgrond).

Tabel 11 geeft het beeld dat er voor laagfrequente trillingen tot 30 Hz relatief weinig verschil is tussen de trillingsoverdracht naar de bom en naar de grond, met uitzondering van de minder kritische Y-component waarbij de trillingsrichting haaks staat op de beweging van de slagpin. Voor hogere frequenties is voor de metingen op de Kop van de Beer de overdracht naar de bom significant groter.

Hiervoor zijn verschillende verklaringen mogelijk:

- Dieper gelegen stijve grondlagen resulteren in reflecties die lokaal tot stijgingen/dalingen in het trillingsniveau kunnen leiden.
- De grotere lokale dichtheid van de bom ten opzichte van de dichtheid van de omringende grond kan resulteren in de reflectie van trillingen die lokaal tot stijgingen/dalingen in het trillingsniveau kunnen leiden;
- De natuurlijke heterogeniteit van de grond kan lokaal in verschillende versnellingsniveaus resulteren;
- Resonantie van de bom of de ontstekker in de bom kan tot pieken in de overdracht leiden.

⁷ Dit frequentiebereik kan tevens voorkomen bij het gebruik van hoog-rendements trilplaten.

Tabel 11 Verhouding in overdracht trilbron-bom en trilbron-grond per richtingscomponent voor verschillende frequentie bereiken, afstanden tot de trilbron en grondsoort⁸.

Frequentie relevant voor constructiewerkzaamheden		Verkeer, heien		Heien, laag frequent trillen van damplanken		Hoog frequent trillen van damplanken		Zeer hoog frequent trillen van damplanken	
Frequentiebereik [Hz]		10 – 20		20 – 30		30 – 40		40 – 60	
Grondtype		Klei	Zand	Klei	Zand	Klei	Zand	Klei	Zand
Bom oriëntatie		Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.
Richting	Afstand bron – bom [m]	Verhoudingsfactor trilling in bom en in grond							
X (horizontaal)	5	x	1	x	1	x	3	x	3
	10	x	2	x	2	x	3	x	4
	20	n.g.	2	n.g.	2	n.g.	2	n.g.	4
Y (horizontaal)	5	2	1	2	3	2	4	1	4
	10	2	1	2	4	2	4	1	4
	20	n.g.	1	n.g.	3	n.g.	3	n.g.	3
Z (verticaal)	5	1	1	2	2	2	4	2	3
	10	2	1	2	1	1	3	1	2
	20	n.g.	1	n.g.	1	n.g.	4	n.g.	4

Er is dus niet duidelijk sprake van één bepalende factor. Hoofdstuk 5 geeft aanbevelingen voor verder onderzoek, indien het nodig blijkt om beter inzicht te krijgen in de mate van invloed van de verschillende factoren worden.

Het is opvallend dat de waarden tussen 30 en 60 Hz groter zijn in een zandgrond (Kop van de Beer) dan in een kleigrond (Zestienhoven). De verwachting was dat de bom een dempende invloed op het trillingsniveau zou hebben. Dit is wat we over het algemeen zien bij de metingen op Zestienhoven. Ook de grilligheid in de waarden over het frequentiespectrum is opvallend bij de metingen op de Kop van de Beer. Enige variatie zal er altijd zijn (zoals waargenomen in Zestienhoven), maar de uitschieters in deze metingen zijn uitzonderlijk.

Een directe vergelijking op basis van grondtype is niet mogelijk aangezien zowel de oriëntatie als de diepte van de bom zijn gevarieerd voor deze testlocaties. Factoren die mogelijk een rol spelen zijn reflectie van trillingen op stijve grondlagen, natuurlijke heterogeniteit van de grond en potentiële resonantie van het bomlichaam of van de ontsteker in de bom.

⁸ N.g. = niet gemeten; x = niet geregistreerd door uitgevallen connectie tussen bekabeling en X-component van de versnellingsopnemer in de bom.

5 Conclusies en aanbevelingen

Een literatuurstudie en metingen zijn uitgevoerd om de trillingsniveaus ter plaatse van de ontsteker in een vliegtuigbom in te schatten voor verschillende afstanden tussen trilbron en bom. Op basis van de literatuurstudie is een rekenmodel gedefinieerd waarmee een inschatting kan worden gemaakt van de trillingsniveaus in de bodem op een bepaalde afstand van een trilbron. Met behulp van de metingen kan een verhoudingsfactor worden afgeleid, waarmee het trillingsniveau in de bodem kan worden omgerekend naar een trillingsniveau in de ontsteker. Bij deze metingen zijn trillingen gegenereerd met een excitator aan het oppervlak. De responsie is gemeten met behulp van versnellingsopnemers nabij de excitator, op de locatie van de ontsteker in de bom en in de grond nabij de bom. Metingen zijn uitgevoerd voor een bom in verticale positie met de versnellingsopnemer op 1 m diepte in een kleigrond (locatie Zestienhoven, grondwater op 1,5 m) en voor een bom in een horizontale positie met de versnellingsopnemer op een diepte van 1,5 m in een zandgrond op de Kop van de Beer (grondwater op 4,8 m). De afstand tussen de excitator en de op dezelfde diepte beneden maaiveld gelegen versnellingsopnemers in de grond en bom bedroeg 5, 10 en 20 m met aanstootrichtingen in lijn met (0°) en haaks op (90°) de lijn tussen de opnemers in de bom en grond⁹. Met behulp van de versnellingssignalen gemeten bij de sensoren zijn overdrachten bepaald van de trilbron naar de bom en naar een positie in de grond nabij de bom. De verhouding tussen deze twee overdrachten is bepaald om inzicht te verkrijgen hoe de trilling in de bom zich verhoudt tot de trilling in de grond afkomstig van dezelfde trilbron. Deze factor kan worden gebruikt bij de bepaling van het trillingsniveau ter plaatse van het ontstekingsmechanisme ten gevolge van een trilbron in de nabije omgeving.

Uit de meetresultaten blijkt dat:

- Voor frequenties tot 30 Hz de trilling in de bom zich verhoudt tot de trilling in de bodem met een factor 1 tot 2, onafhankelijk van de meetconfiguratie;
- Voor frequenties tussen 30 en 60 Hz de trilling in de bom zich verhoudt tot de trilling in de bodem met een factor:
 - 1 tot 2 voor een verticale bom oriëntatie in een kleigrond;
 - 2 tot 4 voor een horizontale bom oriëntatie in een zandgrond.

Op basis van de huidige dataset is niet goed te duiden welke factor verantwoordelijk is voor de waargenomen verschillen tussen de twee grondtypen omdat zowel de oriëntatie als de diepte van de bom zijn gevarieerd voor de testlocaties. Er kan ook geen eenduidige verklaring worden gegeven voor de gemeten trillingen die in de bom significant hoger zijn dan in de grond voor frequenties boven de 30 Hz. Factoren die mogelijk een rol spelen zijn de potentiële resonantie van het bomlichaam of van de ontsteker in de bom, de reflectie van trillingen en de natuurlijke heterogeniteit van de grond. De laatste twee factoren resulteren in de variabiliteit die typisch voorkomt bij grondmetingen, zoals ook blijkt uit de literatuur.

⁹ Voor de Tweede Maasvlakte is een extra meting op 20 m afstand uitgevoerd onder een aanstootrichting van 90°.

Om een beter begrip te krijgen van de verhoudingsfactoren, wordt aanbevolen om:

- De eigenfrequentie van een 1000 lbs bom te bepalen door middel van hamermetingen (om het mogelijke effect van resonantie te kunnen bepalen);
- Reflecties van trillingen afkomstig van de bom of diepere grondlagen te simuleren met een computermodel.

Om de variabiliteit van de resultaten door heterogeniteit van de grond te kunnen kwantificeren wordt aanbevolen om:

- Op meerdere locaties metingen uit te voeren;
- Meerdere versnellingsopnemers in de grond nabij de bom te plaatsen.

Voor de bepaling van een veilige afstand vanaf de trilbron en/of een trillingsrichtlijn wordt aanbevolen om:

- Experimenteel vast te stellen hoe trillingen op een ontsteker kunnen worden gesimuleerd op een triltafel¹⁰;
- In Fase II zowel metingen uit te voeren bij een horizontale als verticale oriëntatie van de ontsteker op een triltafel.

¹⁰ Conform Fase IC [TNO Offerte, 2014].

6 Referenties

Athanasopoulos en Pelekis, 2000

G.A. Athanasopoulos, P.C. Pelekis, Ground vibrations from sheet pile driving in urban environment: measurements, analysis and effects on buildings and occupants, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 19, 371-387, 2000

Auersch en Said, 2010

L. Auersch, S. Said, Attenuation of ground vibrations due to different technical sources, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration* 9, 337-344, 2010

Bendat & Piersol, 2010

Random data – Analysis and measurement procedures, 4th edition, John Wiley and Sons, 2010

Borel et al., 2002

S. Borel, L. Gianceselli, D. Durot, P. Vaillant, L. Barbot, B. Marsset, P. Lijour, Full-scale behaviour of vibratory driven piles in Montoir, Proceedings of the international conference on vibratory pile driving and deep soil compaction, Sept. 2002

Connolly et al., 2014

D.P. Connolly, G. Kouroussis, A. Giannopoulos, O. Verlinden, P.K. Woodward, M.C. Forde, Assessment of railway vibrations using an efficient scoping model, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 58, 37 – 34, 2014

CUR 166, 1997

Publikatie 166, Damwandconstructies, CUR, Gouda, 1997

Deckner, 2013

Ground vibrations due to pile and sheet pile driving – influencing factors, predictions and measurements, Stockholm 2013

Edinburgh, 2016

The University of Edinburgh, Railway Engineering, <https://www.eng.ed.ac.uk/research/themes/railway-engineering>, 2016

Kroon & van Ham, 2012

Analyse en advies met betrekking tot potentiële WOII blindgangers in de Zwolse wijk Holtenbroek, TNO 2012 R10104 | 2, 25 juni 2012

Haupt, 1986

W. Haupt, *Bodendynamik – Grundlagen und Anwendung*, Vieweg, Braunschweig, 1986

- Head & Jardine, 1992
J.M. Head, F.M. Jardine, Ground-borne vibrations arising from piling, CIRIA Technical Note 142, CIRIA, London, U.K., 1992
- Huibers, 1990
Risico van een ondergrondse bomexplosie als gevolg van trillingen veroorzaakt door heien, Majoor M.J. Huijbers, Commandant van de Explosieven Opruimings Dienst (EOD Richtlijn), 1990
- Jongmans, 1996
D. Jongmans, Prediction of ground vibrations caused by pile driving: A new methodology, Engineering Geology 42, 25 – 36, 1996
- Kim & Lee, 1998
D.S. Kim, J.S. Lee, Source and attenuation characteristics of various ground vibrations. Geotechnical earthquake engineering and soil dynamics III, ASCE, Geotechnical Special Publication No. 75, 1998
- Kouroussis, 2014
G. Kouroussis, D.P. Connolly, O. Verlinden, Railway-induced vibrations – a review of vehicle effects, International Journal of Rail Transportation 2, 69 – 110, 2014
- Kroon, Bouma, van Ham, 2015
Inventarisatie van WOII vliegtuigbom ontstekers in NL bodem, TNO 2015 R10074, 15 oktober 2015
- Massarsch, 2004
Vibrations Caused by Pile Driving. Deep foundations, summer 2004 and fall 2004 (two parts)
- Miller en Pursey, 1954
G.F. Miller, H. Pursey, The field and radiation impedance of mechanical radiators on the free surface of a semi-infinite isotropic solid, The National Physical Laboratory, 521 – 541, 1954
- Miller en Pursey, 1955
G.F. Miller, H. Pursey, On the partition of energy between elastic waves in a semi-infinite solid, The National Physical Laboratory, 55 – 69, 1955
- Muller, 1990
Muller, T.K., Mogelijke ondergrondse bomexplosies als gevolg van trillingen veroorzaakt door heien, IFCO, opdracht nummer 89080-2, 4 juli 1990
- Muller, 2007
T.K. Muller, Meten, beoordelen en voorspellen van trillingen in de bouw, Geotechniek, pg 40-46, oktober 2007

- Möller et al., 2000
B. Möller, R. Larsson, P.E. Bengtsson, L. Moritz, Geodynamik i praktiken. Statens geotekniska institut, Information 17, Linköping, Sweden, 2000
- Richart et al., 1970
F.E. Richart jr., J.R. Hall, jr., R.D. Woods, Vibrations of soils and foundations, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1970
- Staalduinen et al., 1991a
P.C. van Staalduinen, M.H.Th.J. Smits, P.H. Waarts,
Trillingsonderzoek ten behoeve van het Handboek damwanden, B-91-0705, Sept. 1991
- Staalduinen et al., 1991b
P.C. van Staalduinen, M.H.Th.J. Smits, P.H. Waarts,,
Trillingsonderzoek t.b.v. het handboek 'damwanden' Achtergronden, B-91-0401, Feb. 1991
- Staalduinen en Smits, 1993
P.C. van Staalduinen, M.Th.J.H. Smits, Trillingscriteria m.b.t. schade aan gebouwen, TNO rapport B-90-822, 1993
- Suhairy, 2000
S. A. Suhairy, Prediction of ground vibration from railways, Swedish National Testing and Research Institute, SP Report 2000: 25, 2000
- TNO Offerte, 2014
TNO Offertenummer: 900904-rev (A), April 2014
- U.S. Explosive Ordnance, May 1947
United States Navy Department Bureau of Ordnance, 1947
- VEO, 2014
4VEO-TRIL.08082.N, kort verslag vergadering d.d. 11 september 2014
- VS-9-861, 2010
VS-9-861, Voorschrift opsporen en ruimen van explosieven, Vastgesteld door C-OTCO d.d. 29 september 2010
- Whyley en Sarsby, 1992
P.J. Whyley, R.W. Sarsby, Ground borne vibration from piling, Ground Engineering, May, 1992
- Woods, 1997
R.D. Woods, Dynamic effects of pile installations on adjacent structures, NCHRP 253, Washington D.C.: National Academy Press, 1997

Zandbergen, 2014

Notitie Gemeente Rotterdam, Stadsontwikkeling Ingenieursbureau,
D. Zandbergen, december 2014

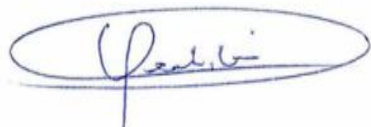
Zandbergen en Opstal, 2014

D. Zandbergen, A.T.P. Opstal, Trillingsonderzoek funderingen
Schilderswijk te Woerden, Gemeente Rotterdam, 2014

7 Ondertekening

Rijswijk, 8 juli 2016

TNO Technical Sciences

A handwritten signature in blue ink, enclosed in a blue oval. The signature appears to be 'P. Hendriksen'.

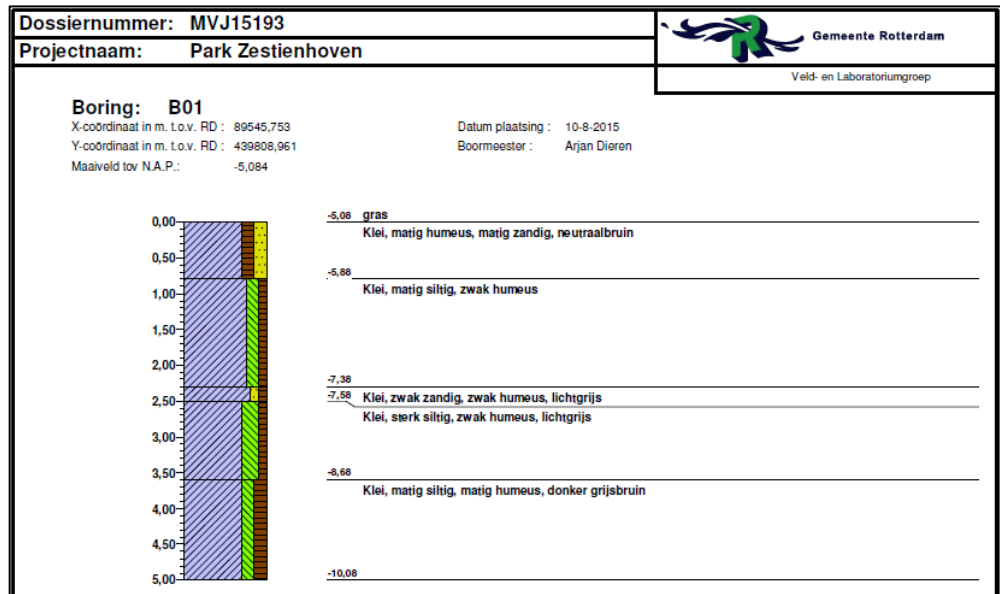
Ing. P. Hendriksen
Afdelingshoofd

A handwritten signature in blue ink, enclosed in a blue oval. The signature appears to be 'E. Kroon'.

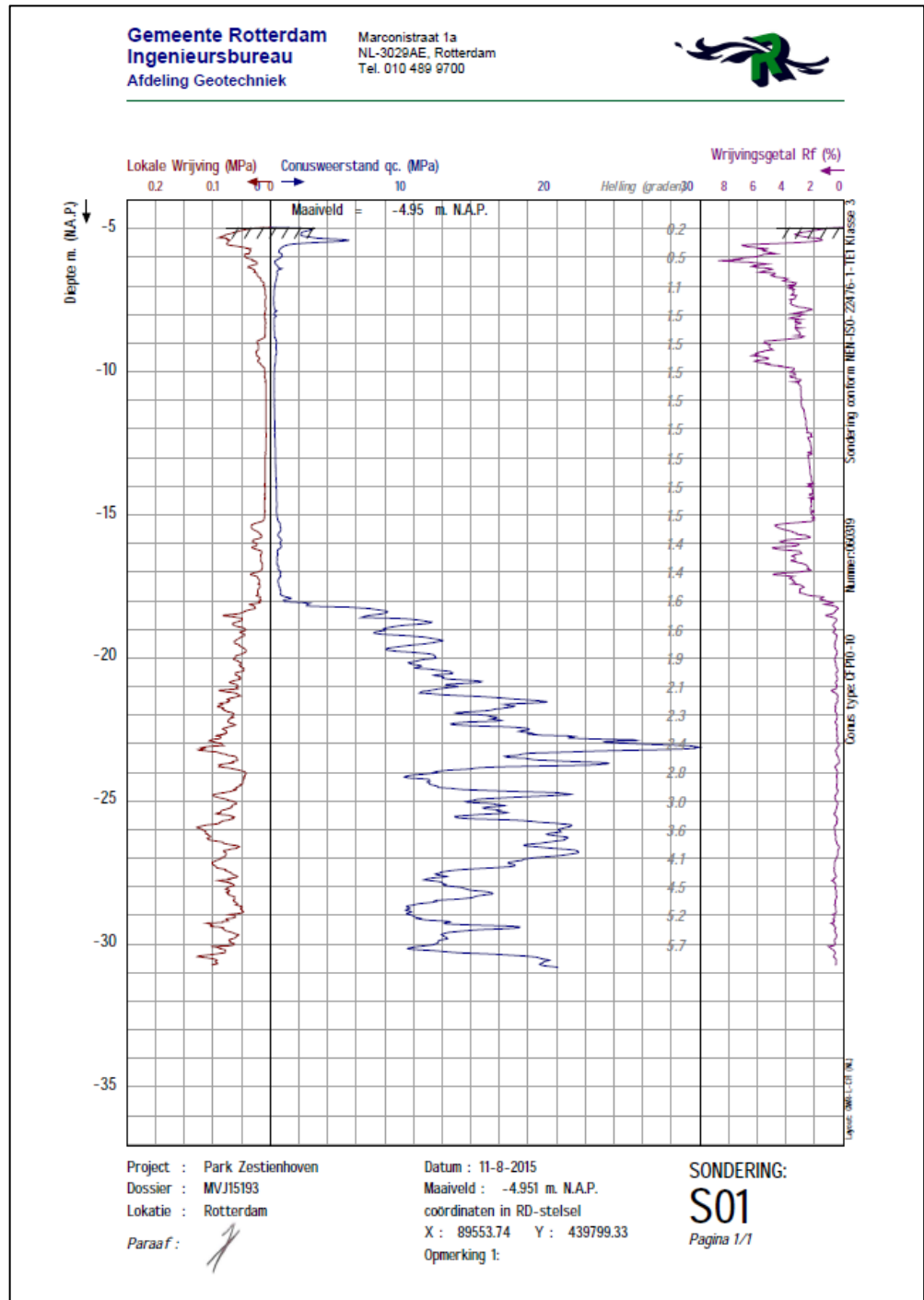
Ir. E. Kroon
Project manager

A Bodemprofielen

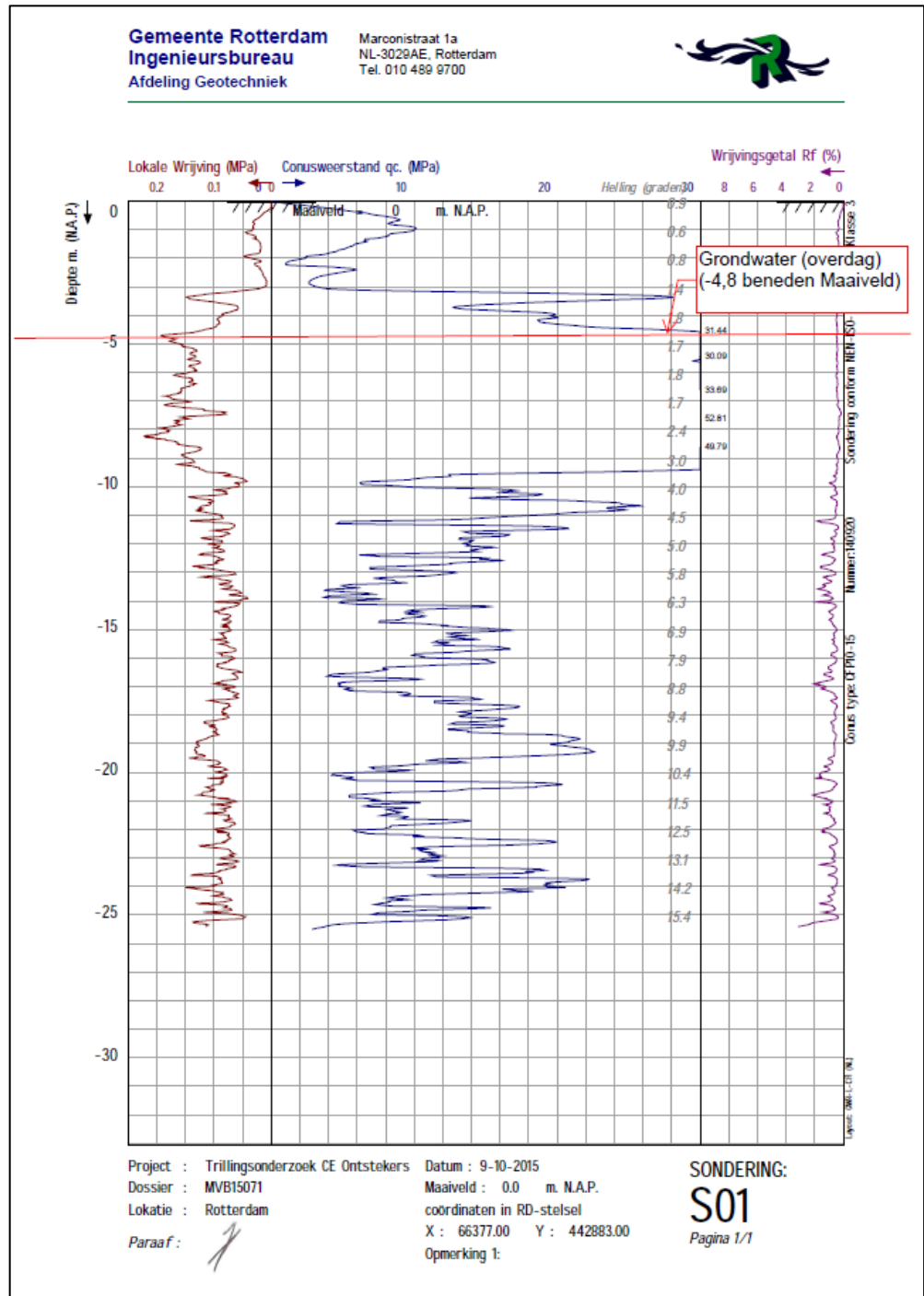
Figuur 36, Figuur 37 en Figuur 38 geven respectievelijk het bodemprofiel en sonderingsgegevens voor Park Zestienhoven en de sonderingsgegevens voor de Kop van de Beer (Tweede Maasvlakte).



Figuur 36 Bodemprofiel Park Zestienhoven.



Figuur 37 Sondering Park Zestienhoven.



Figuur 38 Sondering Kop van de Beer.

B Gegevens US Army-Navy 1000 Bomb GP

Figuur 39 geeft de gegevens van de US AN 1000 GP bom.

Date: AN-M 44 & AN-M 65 & AN- M65A1		ARMY-NAVY BOMBS																													
OVERALL LENGTH. 67.1 in. LENGTH OF BODY. 53.1 in. DIAMETER. 18.8 in. WALL THICKNESS. 0.5 in. TAIL LENGTH. 18.5 in. TAIL WIDTH. 25.4 in. TAIL WEIGHT. 21.5 lbs.		1000 LB. G.P. AN-M 65A1 AN-M 44																													
TARGETS: Ammunition dumps, railway engines and cars, airplanes on the ground, all types of construction, and light surface vessels. In addition, the AN-M 65 with the AN-Mk 230 hydrostatic tail fuze can be used against more heavily armed surface vessels and submarines. THE AN-M 44 WILL NOT TAKE THE AN-Mk 230 FUZE.																															
FUZING: The fuzing of these bombs is the same WITH ONE EXCEPTION: the AN-Mk 230 fuze can be used in the AN-M 65 because this bomb has the M 115 (or M 115A1--see Introduction) adapter booster. The M 115 adapter booster has a sleeve that can be easily removed making it possible to use a fuze with a larger diameter. With the removable sleeve screwed in the adapter booster any ARMY tail fuze may be used. The AN-M 44 uses the M 102 adapter booster which has no removable sleeve and a diameter too small to receive the AN-Mk 230 hydrostatic fuze. The possible fuzing of these bombs is as follows: Regular Missions-- Nose: AN-M 103, M 103 Tail: AN-M 102A2, AN-M 102A1, M 102 Special Missions-- Tail: M 114 (Masthead bombing from land based planes only.) AN-M 117 (Masthead bombing from carriers or land bases.) M 125 (Long Delay Time fuze against land targets.) Nose: Snipping plug, when above tail fuzes are used. Additional Fuzing (AN-M 65 only)--Coastal patrol missions Nose: AN-M 103 (selective arming, M 103) Tail: AN-Mk 230 hydrostatic tail fuze (sleeve in M 115 adapter booster must be removed before this fuze can be used.)																															
WEIGHTS: <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th></th> <th colspan="2">AN-M44</th> <th colspan="2">AN-M 65</th> <th colspan="2">AN-M 65A1</th> </tr> <tr> <th>Weight of filling</th> <th>Amatol 530#</th> <th>T.N.T. 558#</th> <th>Amatol 530#</th> <th>T.N.T. 558#</th> <th>T.N.T. 558#</th> <th>Comp. B 595#</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Total Weight</td> <td>964#</td> <td>990#</td> <td>965#</td> <td>990#</td> <td>990#</td> <td>1040#</td> </tr> <tr> <td>Chg/Wt. Ratio</td> <td>54.9%</td> <td>56.0%</td> <td>55.8%</td> <td>56.0%</td> <td>56.0%</td> <td>57.0%</td> </tr> </tbody> </table>					AN-M44		AN-M 65		AN-M 65A1		Weight of filling	Amatol 530#	T.N.T. 558#	Amatol 530#	T.N.T. 558#	T.N.T. 558#	Comp. B 595#	Total Weight	964#	990#	965#	990#	990#	1040#	Chg/Wt. Ratio	54.9%	56.0%	55.8%	56.0%	56.0%	57.0%
	AN-M44		AN-M 65		AN-M 65A1																										
Weight of filling	Amatol 530#	T.N.T. 558#	Amatol 530#	T.N.T. 558#	T.N.T. 558#	Comp. B 595#																									
Total Weight	964#	990#	965#	990#	990#	1040#																									
Chg/Wt. Ratio	54.9%	56.0%	55.8%	56.0%	56.0%	57.0%																									
REMARKS: The difference between these bombs is in the adapter booster which is employed in the base plate to receive the tail fuze. The AN-M 44 uses the M 102 adapter booster, the AN-M 65 uses the M 115 adapter booster, and the AN-M 65A1 uses the M 115A1 adapter booster. The A1 modification also includes two base plate locking pins fitting into the main filling, preventing removal of the base plate, and a groove in the internal threads of the base plate which mates with the hole of the M 115A1 adapter booster to receive a locking pin, supplied only with anti-withdrawal fuzes. With this pin held in place by the fuze body, the adapter booster cannot be extracted. FOR CONSTRUCTION OF BODY, SUSPENSION, COLOR & MARKINGS, TYPE OF FILLING, AND TAIL CONSTRUCTION SEE - INTRODUCTION . . . Page 38																															

Figuur 39 Gegevens US AN 1000 GP bom [U.S. Explosive Ordnance, May 1947].

C Dataverwerking

Er zijn verschillende spectrale karakteristieken bepaald voor de gemeten tijdsignalen. Deze appendix geeft een beschrijving van de uitgevoerde bewerkingen.

De spectrale vermogensdichtheid is bepaald met behulp van de discrete Fourier Transform [Bendat en Piersol, 2010]:

$$S_{xy}(f, N) = \frac{\Delta t}{N} X^*(f, N) Y(f, N) = \frac{\Delta t}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{i2\pi n f} \sum_{n=0}^{N-1} y_n e^{-i2\pi n f} \quad [1]$$

Hierin is $S(f)$ de spectrale vermogensdichtheid in frequentie band f , waarvoor geldt dat $-1/2\Delta t < f \leq 1/2\Delta t$. Δt is de afstand tussen twee datapunten (in dit geval 1/2000 s), N is het totaal aantal datapunten en x_n en y_n zijn de signalen die worden beschouwd (in dit geval versnellingsignalen). De versnellingsamplitude bij een bepaalde frequentie is bepaald met:

$$|a_x(f, N)| = \sqrt{|S_{xx}(f, N)| N / \Delta t} \quad [2]$$

De coherentie tussen twee signalen is bepaald met [Bendat en Piersol, 2010]:

$$\gamma_{xy}(f) = \sqrt{C_{xy}(f)^2} = \sqrt{|S_{xy}(f)|^2 / S_{xx}(f) S_{yy}(f)} \quad [3]$$

Hierin zijn $S_{xx}(f)$ en $S_{yy}(f)$ de vermogensdichtheid autospectra van signaal x en y en is $S_{xy}(f)$ het cospectrum van signaal x en y . Met behulp van de coherentie kan worden afgeschat of er sprake is van een lineaire relatie tussen signaal x en y . Waarden van de coherentie zullen altijd tussen 0 en 1 liggen. In het geval van een ideale lineaire relatie tussen signaal x en y , zal de coherentie een waarde gelijk aan 1 hebben. Voor coherenties lager dan 1 is er geen sprake van een lineaire relatie. In dit geval zijn de bepaalde overdrachten en faseverschuivingen niet betrouwbaar.

Voor een ideaal Single Input Single Output (SISO) lineair systeem geldt de volgende relatie tussen de vermogensdichtheid spectra:

$$S_{xy}(f) = H(f) S_{xx}(f) \quad [4]$$

Hierin is $H(f)$ de overdrachtsfunctie tussen signaal x en y . $H(f)$ kan geschreven worden als:

$$H(f) = |H(f)| e^{-j\varphi(f)} \quad [5]$$

Hierin is $\varphi(f)$ de faseverschuiving en $|H(f)|$ de grootte van de overdracht.

Met behulp van de faseverschuiving is een afschatting te maken van de golfvoortplantingssnelheid in de grond:

$$v = \Delta f \cdot 2\pi \cdot \lambda / \Delta\varphi \quad [6]$$

Hierin is Δf het frequentiebereik in Hz, λ de golflengte in meter en $\Delta\varphi$ het faseverschil in radialen.

D Resultaat veldmetingen Zestienhoven en Kop van de Beer

In paragraaf D.1 en D.2 worden de meetresultaten behandeld voor de locatie Zestienhoven en de Kop van de Beer. Deze meetresultaten zijn gebruikt voor de bepaling van de verhouding tussen de trilling in de bom en in de grond zoals weergegeven in Tabel 11. Hierbij wordt geen onderscheid gemaakt naar de aanstootrichting maar wordt uitgegaan van de grootst gemeten factor. Tabel 11 levert dus een conservatieve benadering voor de verhouding tussen de trilling in de bom en in de grond.

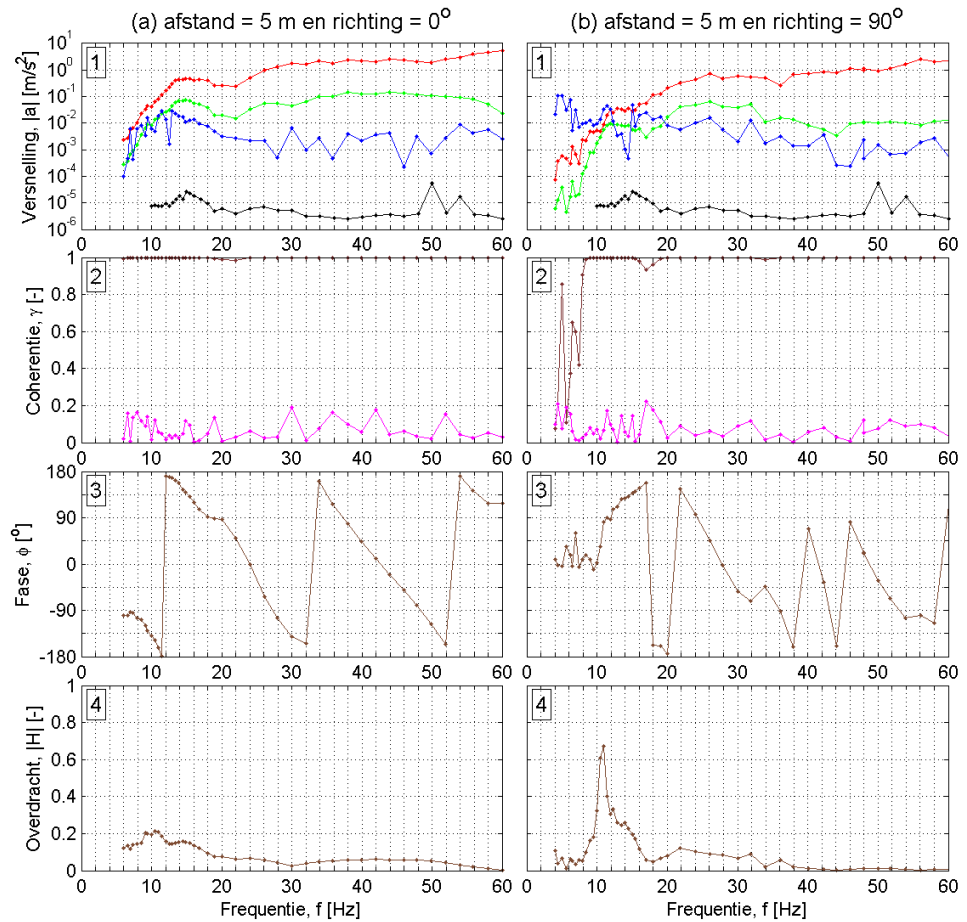
D.1 Zestienhoven

D.1.1 *X-component*

Figuur 40 en Figuur 41 illustreren de resultaten voor de X-component met de trilplaat op 5 en 10 meter. Voor deze component gaf de sensor in de bom een verstoord signaal. Dit is terug te zien in de grote fluctuaties in het versnellingspectrum en de lage coherentie waarden tussen trilbron en bom (zie de twee bovenste grafieken in Figuur 40 en Figuur 41). De resultaten van de metingen zijn hierdoor niet bruikbaar voor bepaling van de invloed van trillingen uit de omgeving op de trillingsniveaus ter plaatse van de ontsteker. Wel geven de resultaten verkregen met de grondsensoren inzicht in de fase en overdracht voor de verschillende aanstootrichtingen en afstanden.

De bovenste grafieken in Figuur 40 geven het versnellingspectrum $a(f)$ met aanstootfrequentie f . Hieruit is op te maken dat de gemeten trillingsniveaus boven 10 Hz bij de trilplaat en bij de grondsensoren nabij de bom meer dan twee ordes (een factor 100) hoger zijn dan de trillingsniveaus ten gevolge van achtergrondtrillingen. Beneden 10 Hz is het aanstootvermogen van de trilplaat over het algemeen niet afdoende om betrouwbare waarden voor de fase en overdracht af te leiden. De lagere coherentie waarden in dit frequentie bereik onderbouwen deze conclusie. In Figuur 40(a.3) is te zien dat over een frequentiebereik van 18 Hz (tussen 34 Hz en 52 Hz) een faseverschuiving van ongeveer 320° ($\sim 5,6$ rad) optreedt. Uitgaande van een golflengte gelijk aan de afstand tussen de sensor bij de trilplaat en de sensor onder de grond (deze is ongeveer 5 m), geeft dit een golfsnelheid van 101 m/s. Over het gehele beschouwde frequentiebereik (12 – 60 Hz) ligt de voortplantingssnelheid rond de 100 m/s. Uit de fase grafiek voor een aanstootrichting van 90° , Figuur 40(b.3), volgt een golfsnelheid tussen de 80 m/s (boven 34 Hz) en 100 m/s (onder 34 Hz).

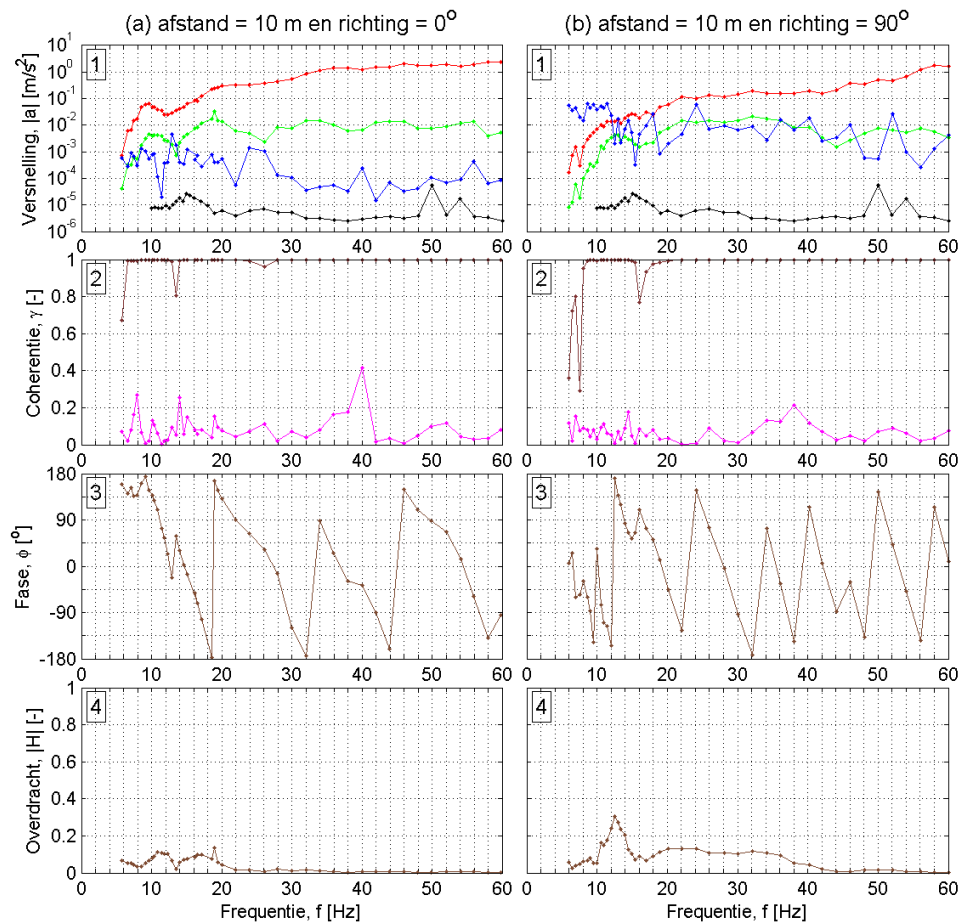
Figuur 40(a.4) en (b.4) illustreren dat, voor frequenties groter dan 18 Hz, de overdrachten 0,1 of kleiner zijn. Voor deze frequenties wordt het trillingsniveau aangebracht met de trilplaat dus een factor 10 kleiner over een afstand van 5 meter. Voor frequenties lager dan 18 Hz worden de trillingen in mindere mate gedempt, met een factor 2 tot 5 afname in trillingsniveau. Voor een aanstootrichting van 90° is er een piek rond 11 Hz, waarbij de overdracht een waarde van 0,65 heeft. Er is echter nergens sprake van opslingeren naar trillingsniveaus groter dan bij de trilplaat.



Figuur 40 Resultaten Zestienhoven X-component met de trilplaat op 5 meter afstand: (a) aanstootrichting is 0° en (b) aanstootrichting is 90°.

Legenda: Figuren rij 1 -- trilbron, -- grond, -- bom, -- achtergrond
 Figuren rij 2 – 4 -- trilbron – grond, -- trilbron - bom

De golfvoortplantingssnelheid voor de metingen op 10 meter afstand ligt tussen de 80 en 120 m/s voor een aanstootrichting van 0°, zie Figuur 41(a.3), en is ongeveer 80 m/s voor 90°, bepaald met Figuur 41(b.3). De overdrachten in Figuur 41(a.4) en (b.4) zijn over het algemeen lager dan bepaald op 5 m. Voor een aanstootrichting van 90° is de overdracht tussen 20 en 44 Hz ongeveer 0,1; dit is vergelijkbaar met de resultaten op 5 m. Ook is er een piek waarneembaar bij 12 Hz, die mogelijk gerelateerd is aan de piek eerder waargenomen in Figuur 41(b.4).



Figuur 41 Resultaten Zestienhoven X-component met de trilplaat op 10 meter afstand: (a) aanstootrichting is 0° en (b) aanstootrichting is 90° .

Legenda: Figuren rij 1 -- trilbron, -- grond, -- bom, -- achtergrond
Figuren rij 2 – 4 -- trilbron – grond, -- trilbron – bom

D.1.2 Y-component

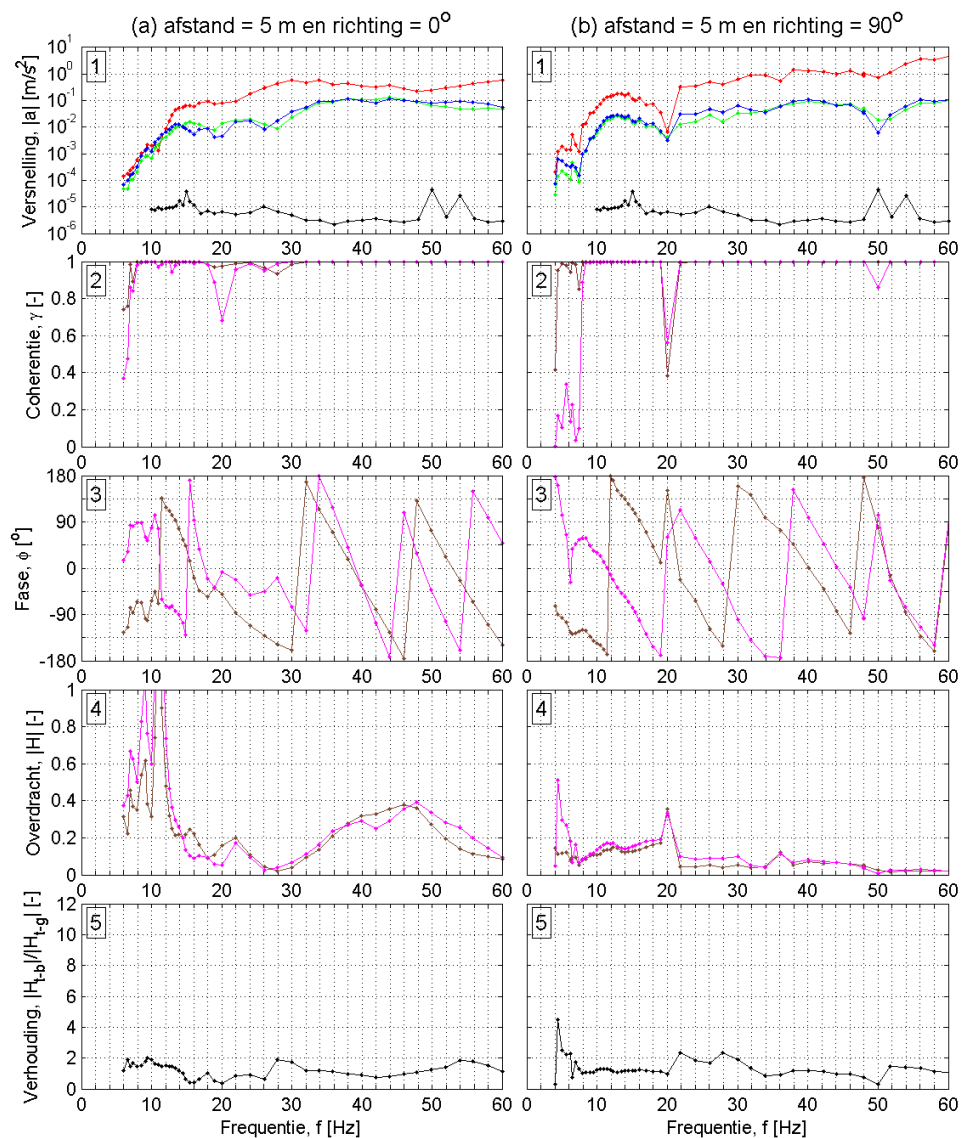
Figuur 42 geeft de Y-component resultaten voor de testen op een afstand van 5 meter tussen trilplaat en bom. Boven een frequentie van 12 Hz zijn de resultaten significant, getuige het versnelling en coherentiespectrum. In het coherentiespectrum in Figuur 42(a.2) valt verder de dip bij 20 Hz op in de coherentie tussen trilplaat en bom. Bij een aanstootrichting van 90° , Figuur 42 (b.2), is er ook een dip te zien bij 20 Hz voor zowel de trilplaat-bom, als de trilplaat-grond coherentie.

De golfsnelheid ligt rond de 70 m/s voor 0° aanstootrichting en rond de 80 m/s voor 90° aanstootrichting.

In Figuur 42(a.4) is te zien dat de overdrachten trilplaat-grond en trilplaat-bom redelijk overeen komen. Voor 0° worden zowel de overdracht naar de bom als naar de grond groter. Bij 11 Hz worden de overdrachten zelfs groter dan 1. Er zou hier sprake kunnen zijn van resonantie, de piek ligt echter wel op de rand van het betrouwbare frequentiegebied van deze meting.

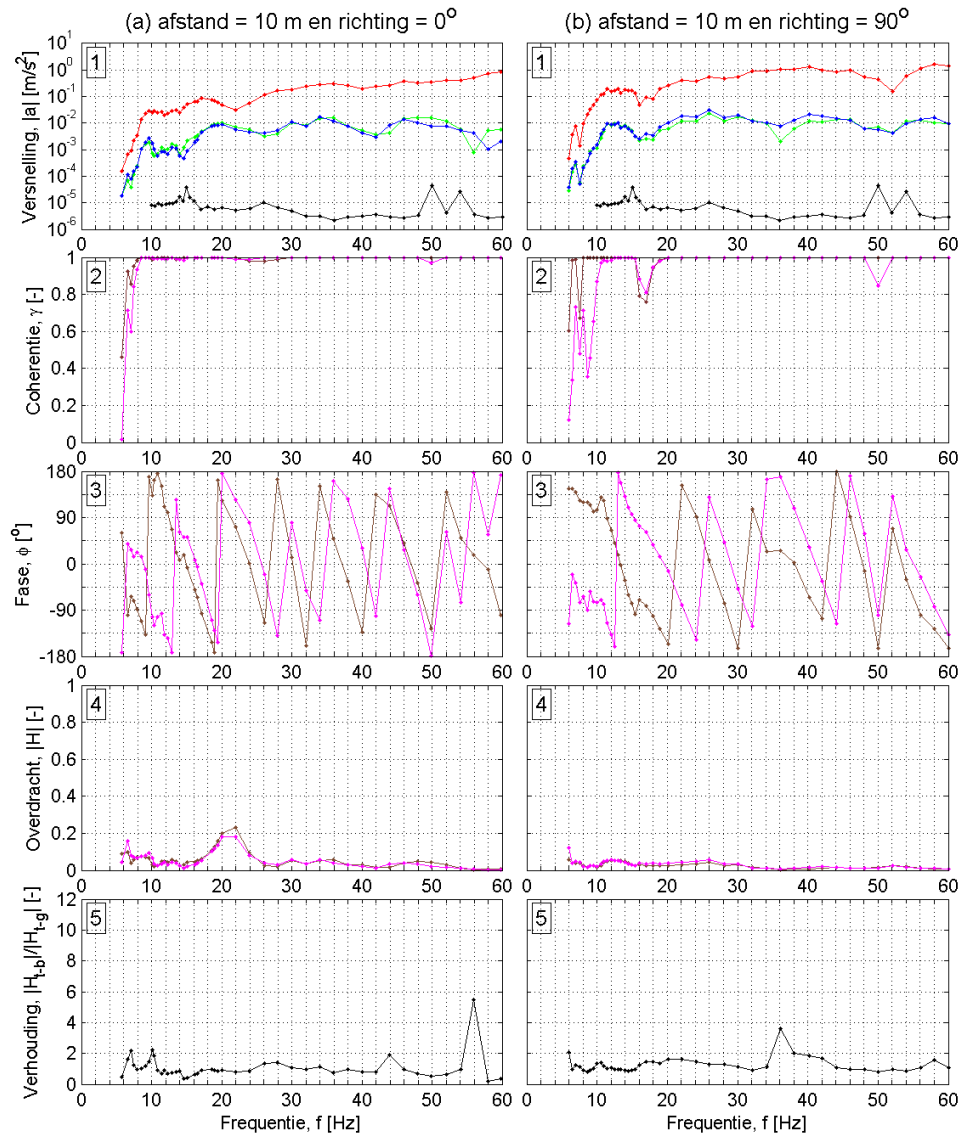
Indien er sprake is van resonantie, dan zou dit resonantie van de grond moeten zijn, aangezien de piek zowel in de grond als bom overdracht is te zien. Verder is te zien dat voor frequenties tussen 36 en 52 Hz de overdracht waarden tussen de 0,2 en 0,4 liggen.

Ook voor 90° aanstootrichting, Figuur 42(b.4), zijn de overdrachten naar bom en grond vergelijkbaar. De overdrachten zijn in deze configuratie echter kleiner, met waarden lager dan 0,2. De verhouding in overdracht trilplaat-bom en trilplaat-grond weergegeven in Figuur 42(a.5) en Figuur 42 (b.5) ligt voor beide aanstootrichtingen tussen 0 en 2. Voor alle frequentie banden (10 – 20 Hz, 20 – 30 Hz, 30 – 40 Hz, en 40 – 60 Hz) wordt een verhoudingsfactor 2 aangenomen als veilige waarde.



Figuur 42 Resultaten Zestienhoven Y-component met de trilplaat op 5 meter afstand: (a) aanstootrichting is 0° en (b) aanstootrichting is 90°.

Legenda: Figuren rij 1 --- trilbron, --- grond, --- bom, --- achtergrond
 Figuren rij 2 – 4 --- trilbron – grond, --- trilbron – bom



Figuur 43 Resultaten Zestienhoven Y-component met de trilplaat op 10 meter afstand: (a) aanstootrichting is 0° en (b) aanstootrichting is 90°.

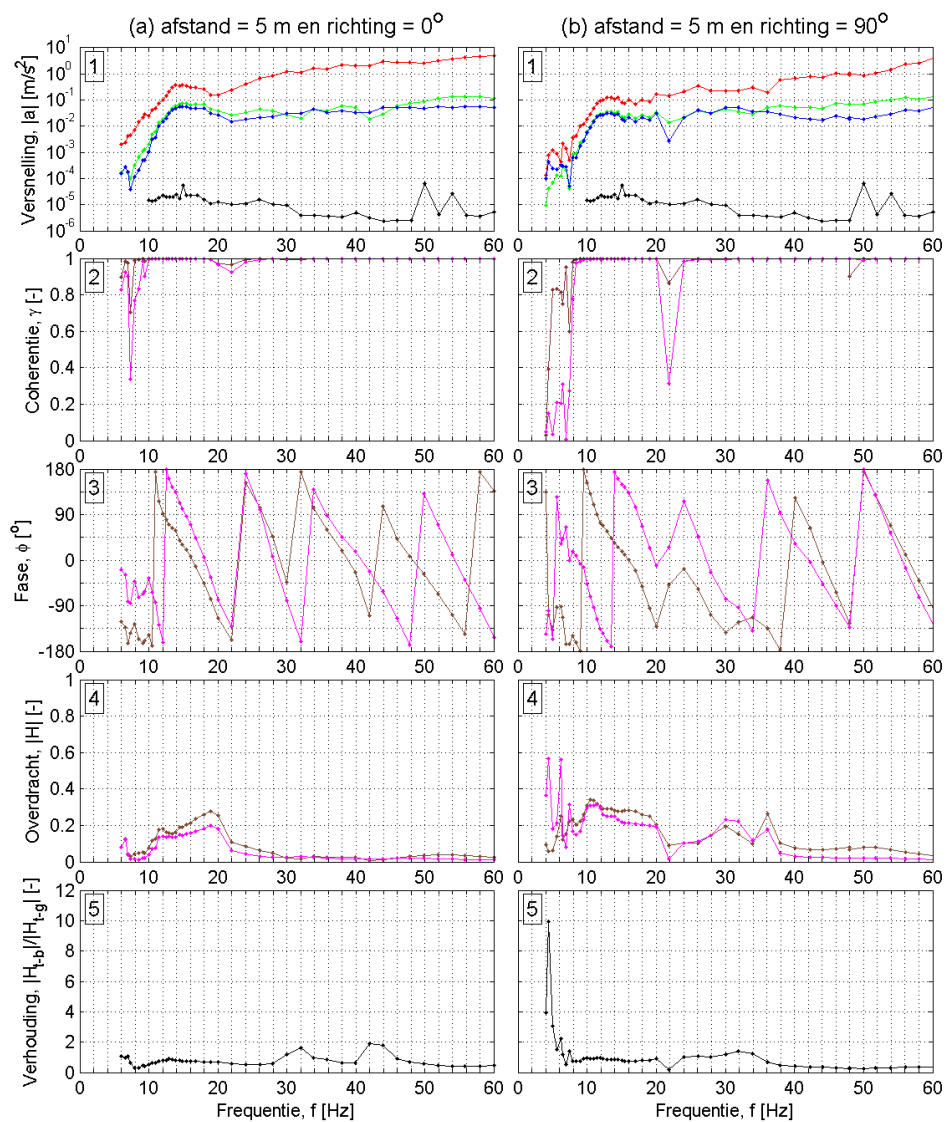
Legenda: Figuren rij 1 -- trilbron, -- grond, -- bom, -- achtergrond
 Figuren rij 2 – 4 -- trilbron – grond, -- trilbron – bom

Figuur 43 geeft de resultaten van de metingen op 10 meter afstand. Boven 12 Hz zijn de resultaten significant. Deze keuze is gebaseerd op de coherentiespectra, weergegeven in Figuur 43 (a.2) en (b.2). De golfsnelheid voor 0° aanstootrichting ligt rond de 70 m/s, en voor 90° aanstootrichting ligt de golfsnelheid rond de 90 m/s. De verhoudingsfactoren gegeven in Figuur 43 (a.5) en (b.5) liggen tussen de 1 en 2 met uitzondering van een piek bij 56 Hz in Figuur 43 (a.5) en een piek bij 36 Hz in Figuur 43 (b.5). Beide pieken zijn niet het gevolg van resonantie door de bom, maar van een daling in het spectrale vermogen bij de grondsensoren, dit is duidelijk te zien in Figuur 43 (a.1) en (b.1). Dit duidt mogelijk op een interferentie effect ten gevolge van reflectie. De trilling aangebracht aan het oppervlak kan bijvoorbeeld worden weerkaatst door een dieper gelegen stijvere grondlaag.

Dit kan lokaal voor een daling (of stijging) in het trillingsniveau zorgen. Zowel de piek bij 56 Hz in Figuur 43 (a.5) en de piek bij 36 Hz in Figuur 43 (b.5) worden daarom buiten beschouwing gelaten voor de bepaling van de gemiddelde overdrachtsfactor. Op basis van Figuur 25(a.5) en (b.5) wordt een verhoudingsfactor van 2 als conservatieve waarde voor het gehele frequentiebereik aangenomen.

D.1.3 Z-component

Figuur 44 en Figuur 45 geven de resultaten voor de Z-component. Vanwege de verticale oriëntatie van de bom in deze testen, is het ontstekingsmechanisme waarschijnlijk het meest gevoelig voor trillingen in deze richting.



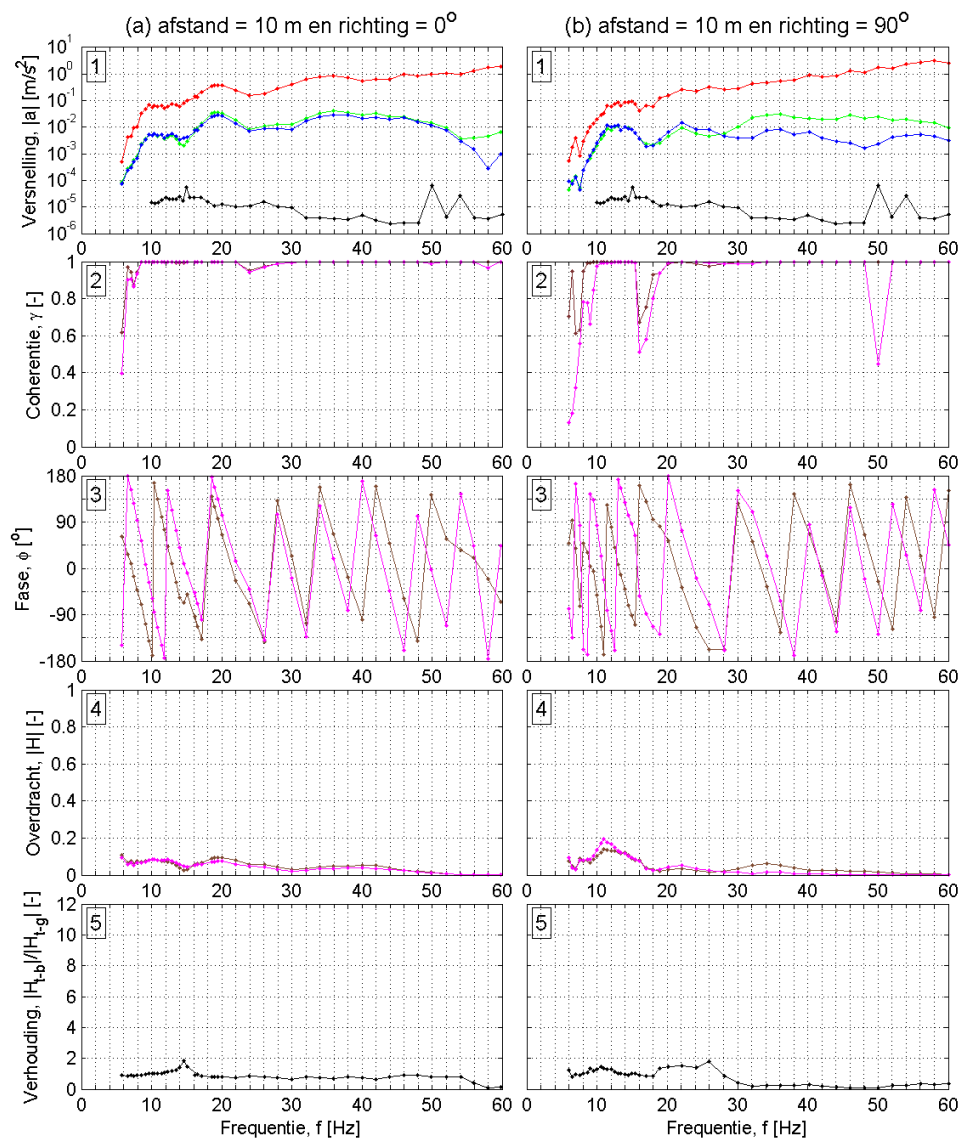
Figuur 44 Resultaten Zestienhoven Z-component met de trilplaat op 5 meter afstand: (a) aanstootrichting is 0° en (b) aanstootrichting is 90°.

Legenda: Figuren rij 1 -- trilbron, -- grond, -- bom, -- achtergrond
 Figuren rij 2 – 4 -- trilbron – grond, -- trilbron – bom

Op basis van het coherentiespectrum in Figuur 44(a.2) en (b.2) blijkt dat de resultaten betrouwbaar zijn vanaf 10 Hz. Uit de fase verschuivingen in Figuur 44(a.3) en (b.3) volgen golfsnelheden tussen de 60 en 90 m/s voor 0° en rond de 60 m/s voor 90° aanstootrichting.

De overdrachten weergegeven in zie Figuur 44 (a.4) en (b.4) blijven onder de 0,4 voor frequenties tot 20 Hz, tussen 20 en 60 Hz is de overdracht lager dan 0,3. Bij 0° aanstootrichting is de trilling gedempt vanaf 22 Hz, bij 90° vanaf 40 Hz.

Zowel voor 0° als 90° aanstootrichting zijn er geen grote stijgingen in de verhoudingsfactor tussen bom overdracht en grond overdracht, zie Figuur 44(a.5) en (b.5). Tussen 10 en 30 Hz wordt de factor niet groter dan 1.



Figuur 45 Resultaten Zestienhoven Z-component met de trilplaat op 10 meter afstand: (a) aanstootrichting is 0° en (b) aanstootrichting is 90°.

Legenda: Figuren rij 1 -- trilbron, -- grond, -- bom, -- achtergrond
 Figuren rij 2 – 4 -- trilbron – grond, -- trilbron – bom

Vanaf 30 tot 40 Hz zijn er voor beide aanstootrichtingen verhoudingsfactoren tot ongeveer 1,7 bepaald. Voor de 30 – 40 Hz frequentieband is een verhoudingsfactor van 2 dus een veilige waarde. Voor 0° is de verhoudingsfactor 2 bij 42 en 44 Hz. Op basis hiervan wordt ook voor de 40 – 60 Hz frequentieband een verhoudingsfactor van 2 voorgesteld.

De resultaten met de trilplaat op 10 meter afstand zijn weergegeven in Figuur 45. Vanaf 10 Hz zijn de resultaten significant. De golfvoortplantingssnelheden voor 0° en 90° aanstootrichting liggen tussen de 70 en 100 m/s. De overdrachten voor beide aanstootrichtingen, weergegeven in Figuur 45(a.4) en (b.4) zijn voor het hele frequentiebereik kleiner dan 0,2. De verhoudingsfactor in Figuur 45(a.5) en (b.5) heeft voor het gehele frequentiebereik waarden kleiner dan 2, en is voor frequenties hoger dan 30 Hz gelijk aan 1 of kleiner. Voor 0° aanstootrichting is er één piekje waarneembaar in Figuur 45(a.5) bij 15 Hz. Daarom wordt voorgesteld om in de 10 – 20 Hz frequentieband een verhoudingsfactor van 2 toe te passen. Ook voor de 20 – 30 Hz frequentieband wordt een factor 2 voorgesteld, vanwege de verhoudingsgetallen bepaald voor de 90° aanstootrichting in deze range. Voor de frequentiebanden 30 – 40 en 40 – 60 Hz voldoet een verhoudingsfactor van 1.

D.2 Kop van de Beer

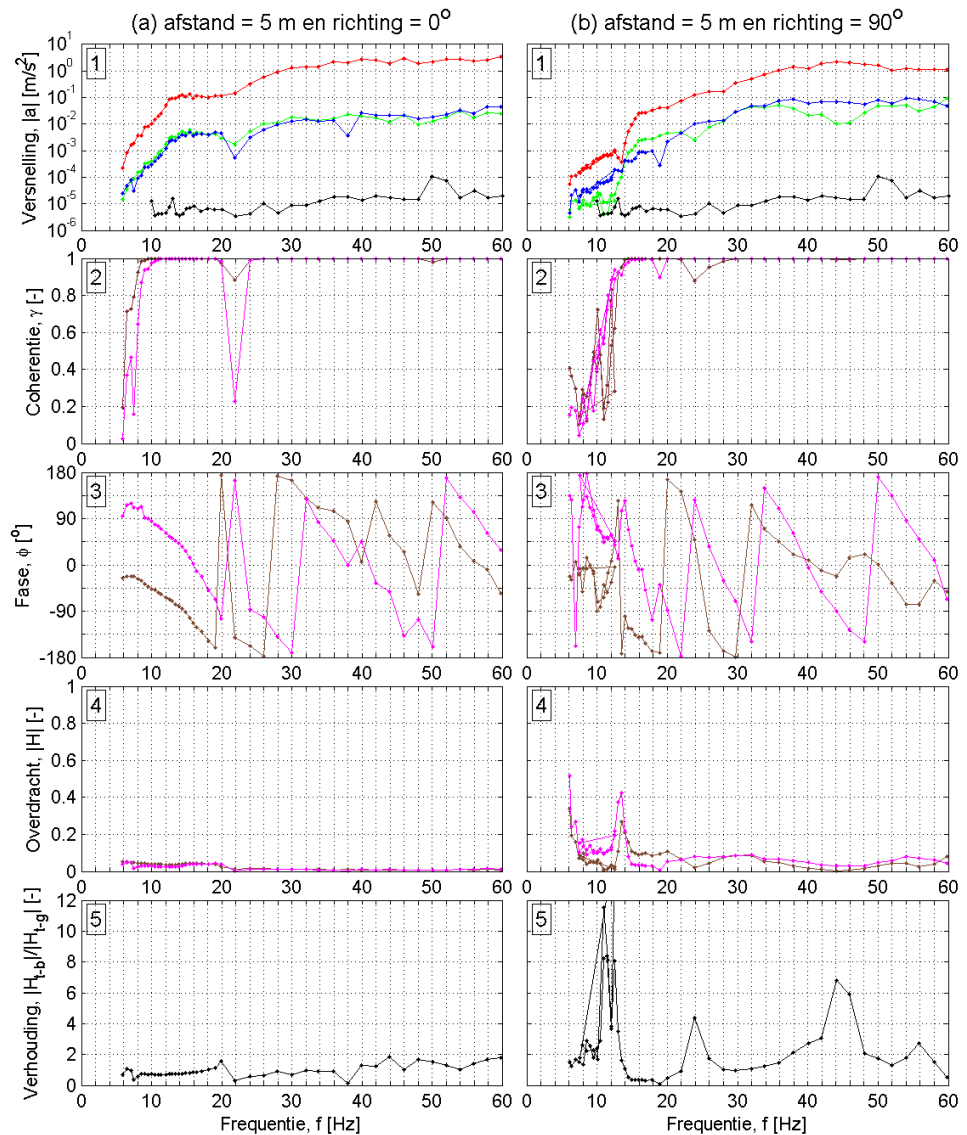
D.2.1 X-component

Figuur 46 geeft de resultaten voor de X-component met de trilplaat op 5 meter. Vanwege de horizontale ligging van de bom in deze test is dit waarschijnlijk de meest gevoelige richting waarin het ontstekingsmechanisme kan worden aangestoten. Uit de versnellings- en coherentie spectra blijkt dat de metingen significant zijn vanaf 10 Hz voor 0° en vanaf 14 Hz voor 90° aanstootrichting. De faseverschuiving in Figuur 46 (a.3) resulteert in een golfsnelheid tussen de 60 en 100 m/s. Voor 90° aanstootrichting, weergegeven in Figuur 46(b.3), worden golfsnelheden gevonden tussen 90 en 160 m/s.

De overdrachten te zien in Figuur 46(a.4) en (a.5) zijn over het hele frequentiebereik gelijk aan of kleiner dan 0,1. De trillingen afkomstig van de trilplaat worden dus gedempt; er is nergens sprake van opslingering naar trillingsniveaus groter dan bij de trilplaat.

Bij 0° aanstootrichting, te zien in Figuur 46(a.5), is de verhouding tussen de overdracht naar de bom en naar de grond vergelijkbaar tot 40 Hz, met uitzondering van een piekje bij 20 Hz. Het piekje bij 20 Hz valt samen met een zakking in het coherentiespectrum, zie Figuur 46(a.2), en kan dus buiten beschouwing worden gelaten. Tot 40 Hz kan een verhoudingsfactor van 1 worden toegepast, voor frequenties boven 40 Hz is een verhoudingsfactor 2 een veilige waarde.

De verhoudingsfactor bij 90° aanstootrichting, weergegeven in Figuur 46(b.5), vertoont grote variatie met frequentie. De piek bij 24 Hz is niet van belang vanwege de dip in het trilbron-grond coherentie spectrum bij deze frequentie. De piek bij 44 – 46 Hz wordt buiten beschouwing gelaten, aangezien deze verhoudingsfactoren een gevolg zijn van een dip in het grond spectrum. Tot 30 Hz zijn de overdrachten naar de bom en grond vergelijkbaar. In de frequentieband tussen 30 en 40 Hz is een verhoudingsfactor 3 een veilige waarde. Ook voor frequenties boven 40 Hz kan de overdracht naar de bom tot 3 keer groter zijn dan de overdracht naar de nabijgelegen positie in de grond.



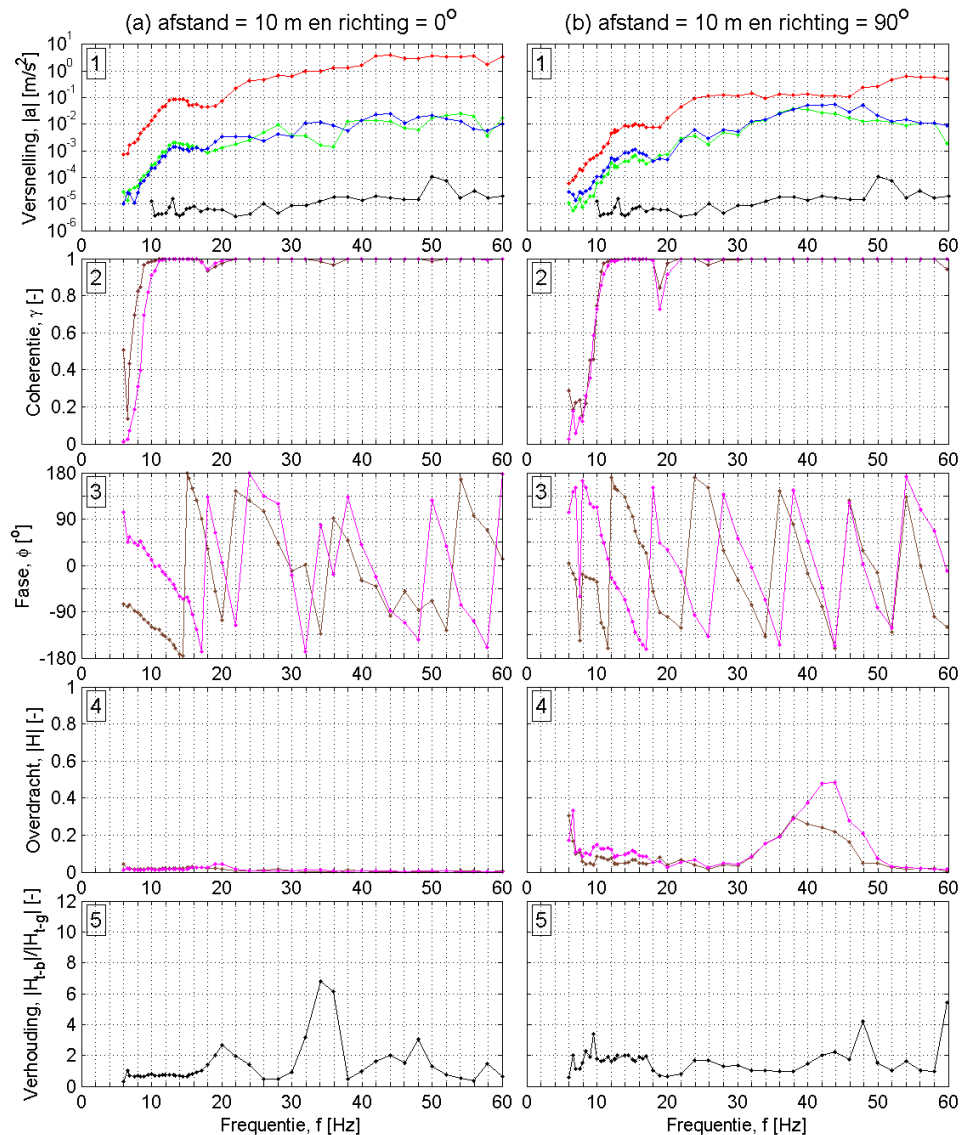
Figuur 46 Resultaten Kop van de Beer X-component met de trilplaat op 5 meter afstand: (a) aanstootrichting is 0° en (b) aanstootrichting is 90°.

Legenda: Figuren rij 1 -.- trilbron, -.- grond, -.- bom, -.- achtergrond
 Figuren rij 2 – 4 -.- trilbron – grond, -.- trilbron – bom

Figuur 47 geeft de resultaten van de meting op 10 meter afstand. De golfsnelheid bij 0° aanstootrichting, bepaalt uit Figuur 47(a.3), vertoont variatie met frequentie. De snelheid ligt tussen 60 m/s bij frequenties lager dan 34 Hz, en 120 m/s bij frequenties hoger dan 34 Hz. Voor 90° aanstootrichting is de golfsnelheid ongeveer 90 m/s.

Figuur 47(a.5) en (b.5) geven de verhoudingsfactor tussen de overdracht naar de bom en de overdracht naar de grond. Bij 0° aanstootrichting is de piek bij 34 en 36 Hz het gevolg van een dip in het grondspectrum. Daarnaast is een kleine zakking in het coherentie spectrum waarneembaar bij deze frequenties. Deze piek wordt daarom buiten beschouwing gelaten.

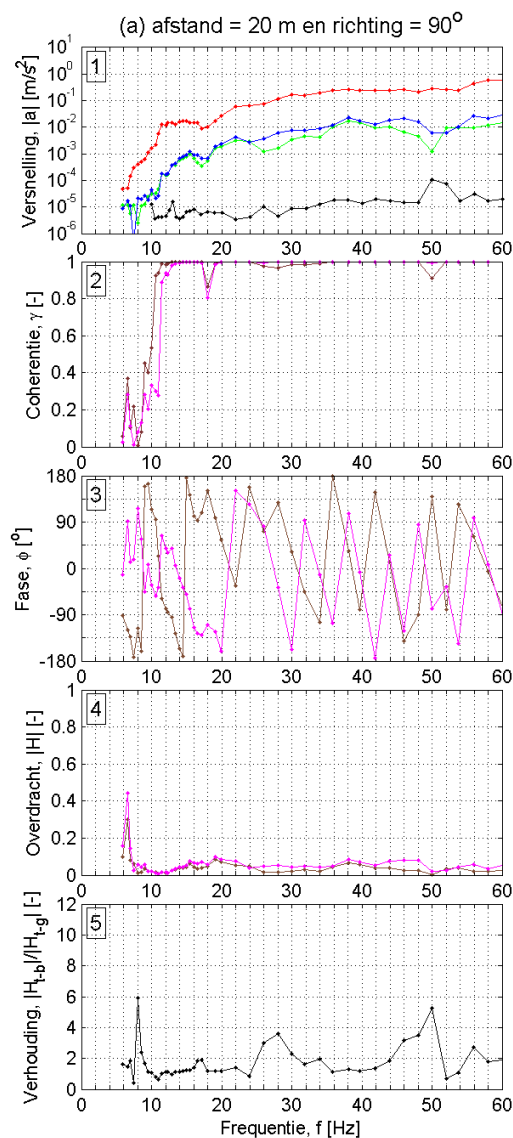
Ook bij de piek van 20 Hz is een kleine dip in het coherentie spectrum te zien. In de frequentie band tussen 10 en 30 Hz is een verhoudingsfactor van 2 een veilige waarde. Tussen 30 en 40 Hz is de bomoverdracht tot een factor 3 groter dan de grondoverdracht, hierbij zijn de waarden bij 34 en 36 Hz buiten beschouwing gelaten. Boven 40 Hz is ook een verhoudingsfactor 3 van toepassing. Voor de 90° aanstootrichting ligt de verhoudingsfactor tussen 1 en 2, met uitzondering van de piek bij 48 Hz. De piek bij 60 Hz wordt genegeerd vanwege de dip in het grondspectrum en in het coherentiespectrum. Tussen 10 en 30 Hz geldt een verhoudingsfactor van 2, tussen 30 en 40 Hz een factor 1. Boven 40 Hz is een factor 4 van toepassing.



Figuur 47 Resultaten Kop van de Beer X-component met de trilplaat op 10 meter afstand: (a) aanstootrichting is 0° en (b) aanstootrichting is 90°.

Legenda: Figuren rij 1 --o-- trilbron, --x-- grond, --v-- bom, --*-- achtergrond
 Figuren rij 2 – 4 --o-- trilbron – grond, --v-- trilbron – bom

Figuur 48 geeft de resultaten van de meting bij 20 meter en 90°. De golfsnelheid ligt rond de 100 m/s. Figuur 48 (a.5) geeft de verhouding tussen de overdracht naar de bom en naar de grond. Tussen 10 en 24 Hz ligt deze factor tussen 1 en 2. Bij 26 en 28 Hz is de verhouding groter als gevolg van een dip in het grondspectrum. Voor deze frequenties is een kleine dip in het coherentiespectrum te zien, dus deze piek is niet van toepassing. Tussen 30 en 40 Hz komt de verhouding niet boven de 2; boven 40 Hz zijn verhoudingswaarden bepaald tot 4. De piek bij 50 Hz komt overeen met een dip in het coherentie spectrum, deze piek wordt niet in beschouwing genomen. Tussen 10 en 40 Hz is een verhoudingsfactor van 2 een veilige waarde, en tussen 40 en 60 Hz een factor 4.

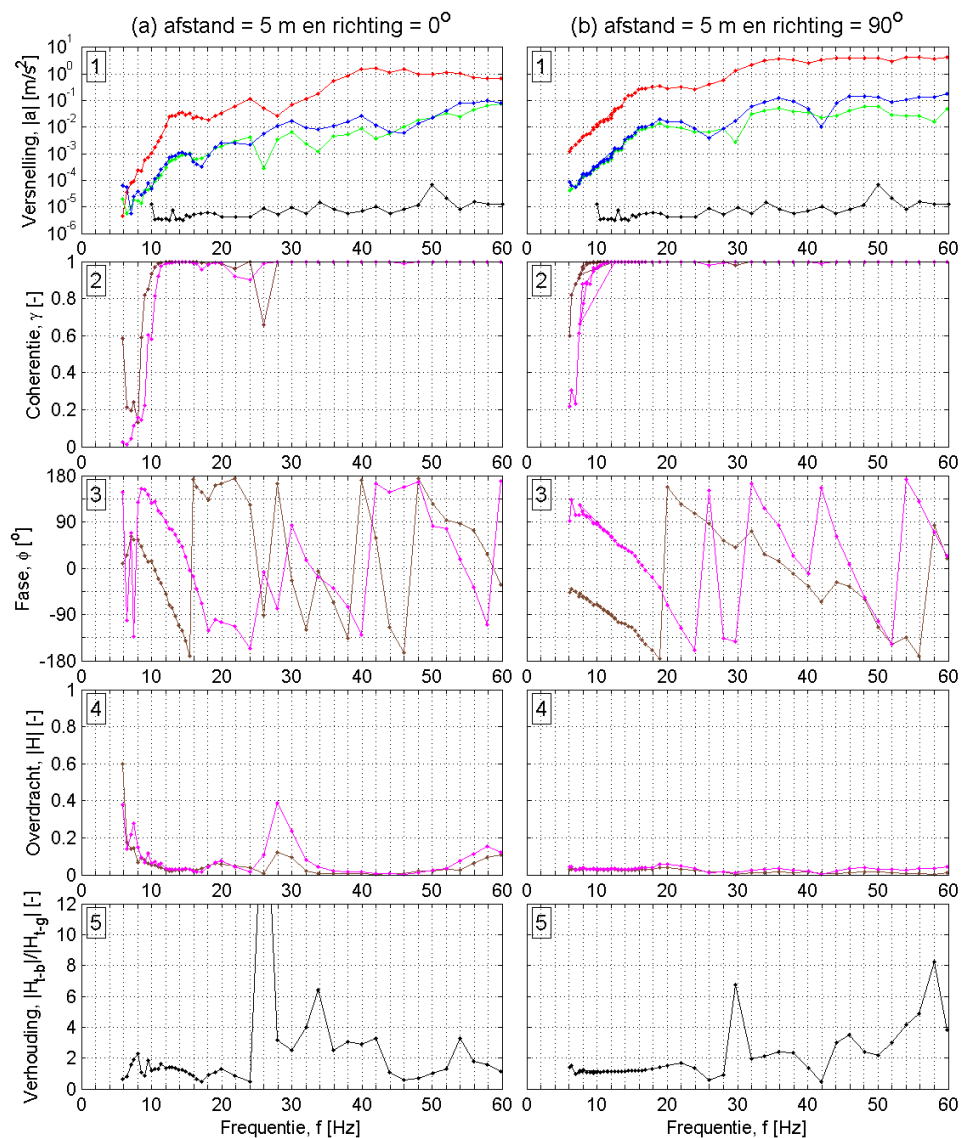


Figuur 48 Resultaten Kop van de Beer X-component met de trilplaat op 20 meter afstand: (a) aanstootrichting is 0° en (b) aanstootrichting is 90°.

Legenda: Figuren rij 1 -- trilbron, -- grond, -- bom, -- achtergrond
 Figuren rij 2 – 4 -- trilbron – grond, -- trilbron – bom

D.2.2 Y-component

Figuur 49 geeft de resultaten van de metingen op 5 meter afstand. De golfsnelheid voor 0° aanstootrichting is ongeveer 60 m/s, voor 90° varieert de golfsnelheid tussen 90 en 120 m/s. Bij 0° aanstootrichting is de verhouding tussen de overdracht naar de bom en naar de grond vergelijkbaar tot 24 Hz, dit is te zien in Figuur 49(a.5). De piek bij 24 Hz is niet van belang vanwege de dip in het trilbron-grond coherentie spectrum. De piek bij 34 Hz is het gevolg van een dip in het grondspectrum, en wordt daarom buiten beschouwing gelaten. Tot 20 Hz zijn de overdrachten naar bom en grond gelijkwaardig. Tussen 20 en 30 Hz is de bomoverdracht tot een factor 3 groter dan de grondoverdracht.

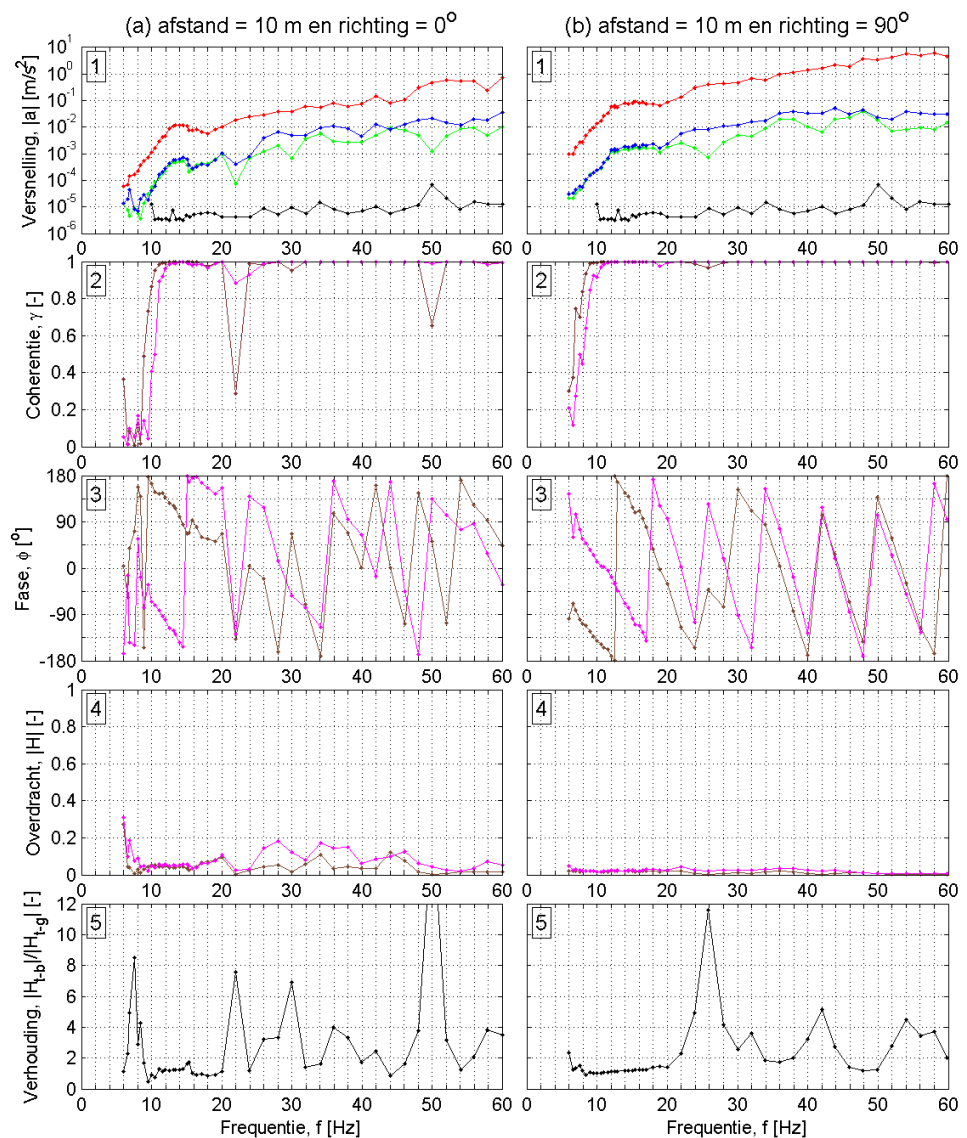


Figuur 49 Resultaten Kop van de Beer Y-component met de trilplaat op 5 meter afstand: (a) aanstootrichting is 0° en (b) aanstootrichting is 90°.

Legenda: Figuren rij 1 -- trilbron, -- grond, -- bom, -- achtergrond
 Figuren rij 2 – 4 -- trilbron – grond, -- trilbron – bom

Tussen 30 en 40 Hz is de verhoudingsfactor 4, en boven 40 Hz is deze 3. De verhoudingsfactor bij 90° aanstootrichting, weergegeven in Figuur 49(b.5), vertoont pieken bij 30 en 58 Hz. Beide pieken zijn het gevolg van zakkingen in het grondspectrum en kunnen buiten beschouwing gelaten worden. Voor een frequentiebereik tussen 10 en 30 Hz voldoet een verhoudingsfactor van 1. Tussen 30 en 40 Hz geldt een factor 2, en voor frequenties hoger dan 40 Hz een factor 4.

Figuur 50 geeft de meetresultaten op 10 meter afstand. De golfsnelheid voor 0° aanstootrichting ligt tussen de 70 en 100 m/s. De golfsnelheid voor een aanstootrichting van 90° ligt rond de 70 m/s.

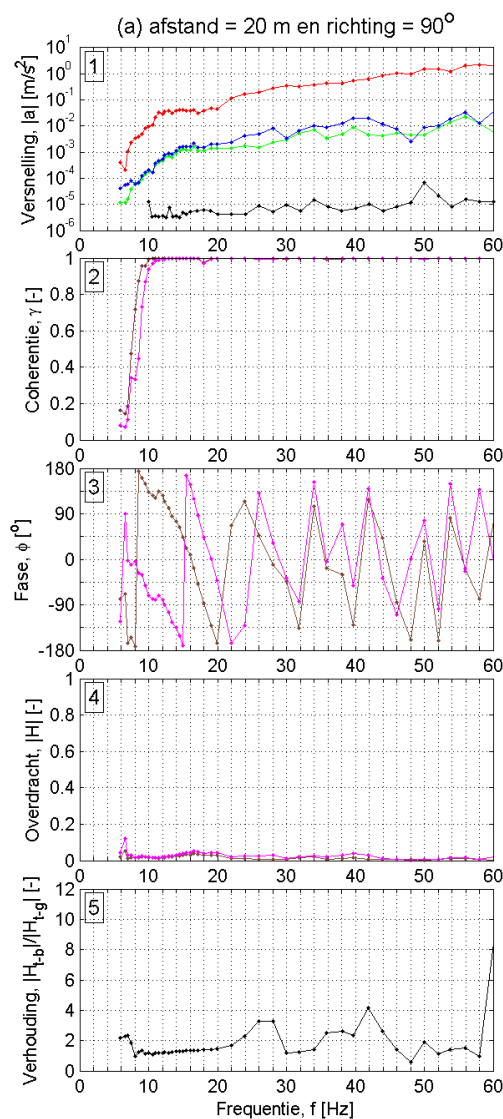


Figuur 50 Resultaten Kop van de Beer Y-component met de trilplaat op 10 meter afstand: (a) aanstootrichting is 0° en (b) aanstootrichting is 90°.

Legenda: Figuren rij 1 -- trilbron, -- grond, -- bom, -- achtergrond
 Figuren rij 2 – 4 -- trilbron – grond, -- trilbron – bom

De verhoudingsfactor voor 0° aanstootrichting, weergegeven in Figuur 50(a.5), vertoont pieken bij 22 Hz, 30 Hz, en 50 Hz. Deze pieken zijn allemaal te negeren, vanwege dalingen in het coherentiespectrum. Tussen 10 en 20 Hz zijn de bomoverdracht en grondoverdracht vergelijkbaar. Voor frequenties groter dan 20 Hz is de bomoverdracht een factor 4 groter dan de grondoverdracht. De verhoudingsfactor voor 90° aanstootrichting vertoont pieken bij 26 Hz en 42 Hz. Beide pieken zijn te negeren aangezien ze het gevolg zijn van een dip in het grondspectrum. Als deze pieken buiten beschouwing worden gelaten kan tussen 10 en 20 Hz worden uitgegaan van een vergelijkbare bom- en grondoverdracht.

Figuur 51 geeft de resultaten van de metingen met de trilplaat op 20 meter afstand.



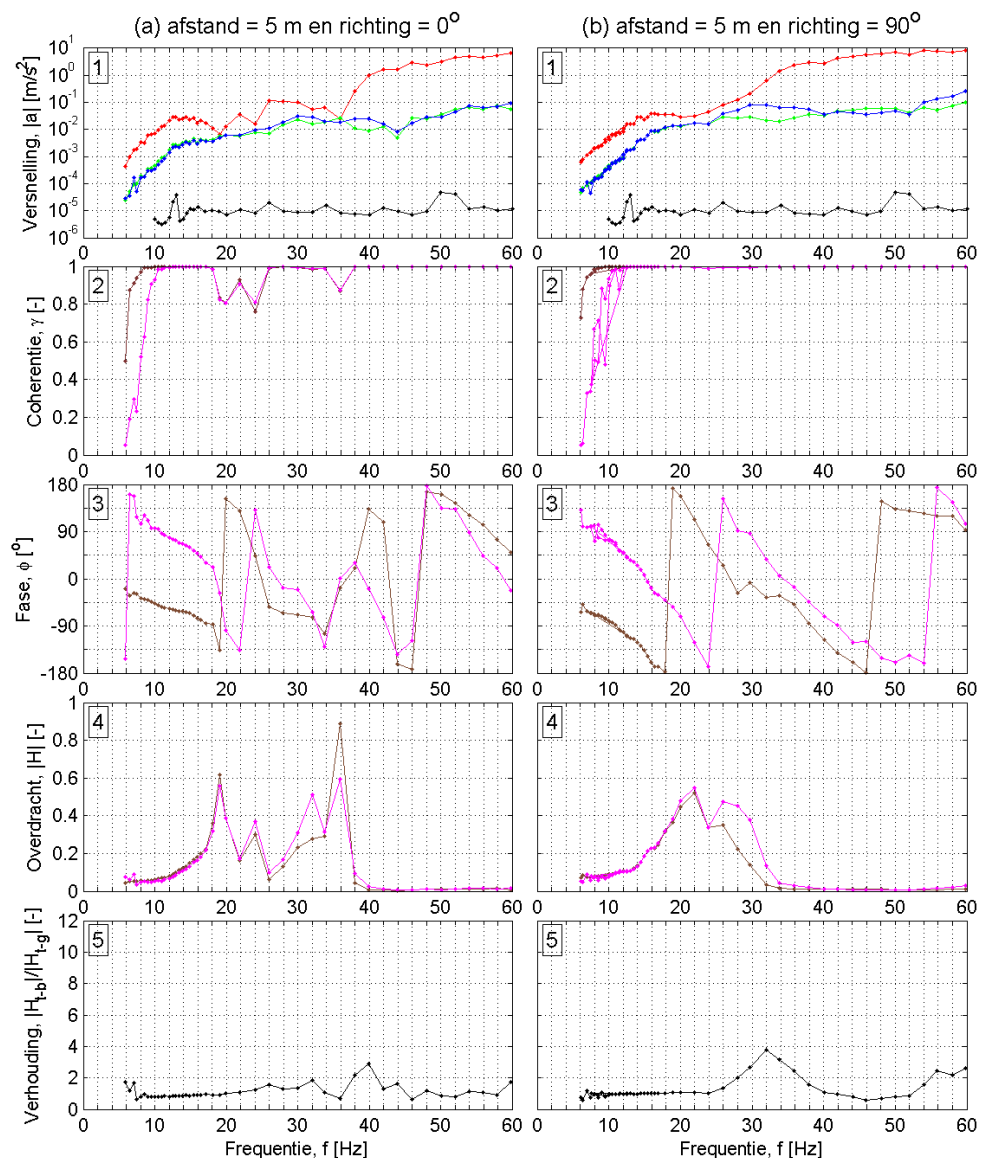
Figuur 51 Resultaten Kop van de Beer Y-component met de trilplaat op 20 meter afstand: (a) aanstootrichting is 0° en (b) aanstootrichting is 90°.

Legenda: Figuren rij 1 -- trilbron, -- grond, -- bom, -- achtergrond
 Figuren rij 2 – 4 -- trilbron – grond, -- trilbron – bom

Uit het coherentiespectrum blijkt dat boven 12 Hz de resultaten betrouwbaar zijn; voor deze frequenties heeft de coherentie een waarde 1. Uit Figuur 51(a.3) kan een golfsnelheid worden afgeleid van ongeveer 110 m/s. Tussen 10 en 20 Hz is de bomoverdracht vergelijkbaar met de grondoverdracht. Tussen 20 en 60 Hz is de bomoverdracht een factor 3 groter. De piek bij 42 Hz en 60 Hz zijn het gevolg van dalingen in het grondpectrum, en worden buiten beschouwing gelaten.

D.2.3 Z-component

Figuur 52 geeft de resultaten van de metingen met de trilplaat op 5 meter afstand. De golfsnelheid voor een aanstootrichting van 0° ligt tussen de 50 en 90 m/s.



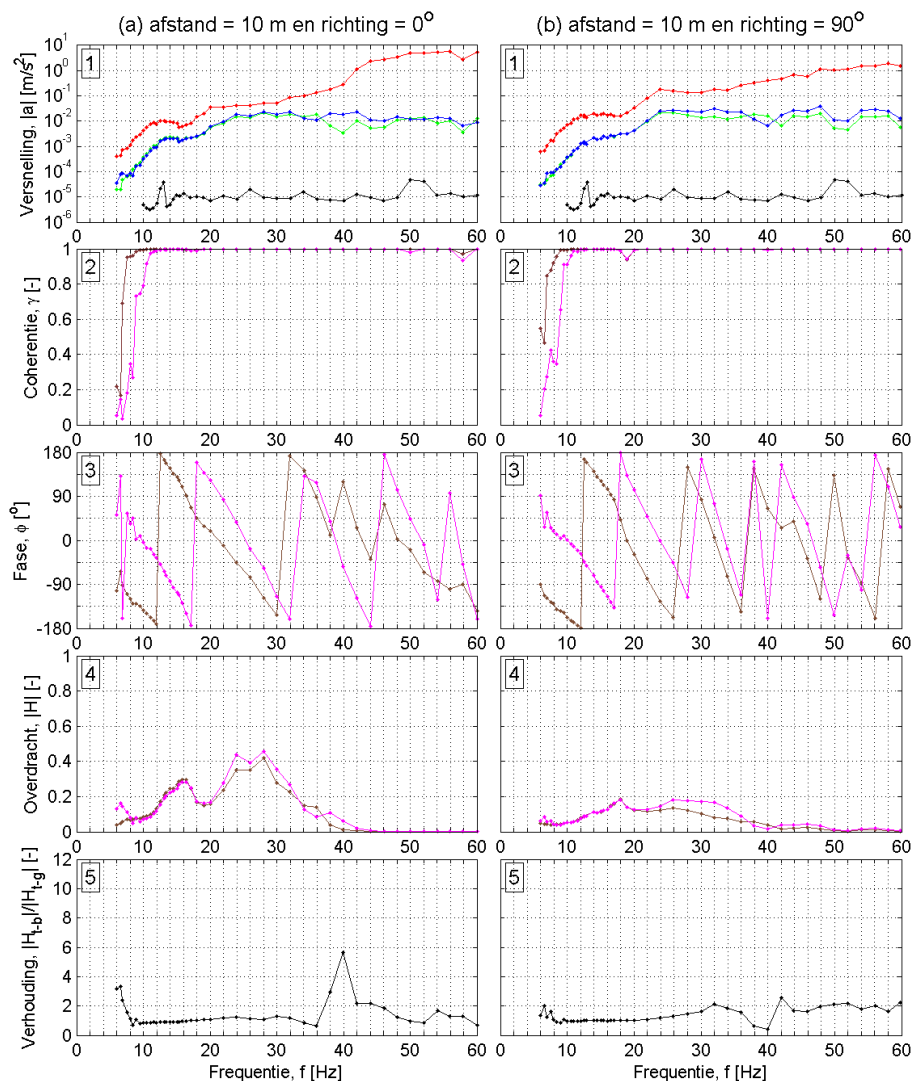
Figuur 52 Resultaten Kop van de Beer Z-component met de trilplaat op 5 meter afstand: (a) aanstootrichting is 0° en (b) aanstootrichting is 90°.

Legenda: Figuren rij 1 -- trilbron, -- grond, -- bom, -- achtergrond
 Figuren rij 2 – 4 -- trilbron – grond, -- trilbron – bom

Voor een 90° aanstootrichting ligt de golfsnelheid rond de 80 m/s. De verhouding in bom- en grondoverdracht bij een aanstootrichting van 0° heeft tussen 10 en 20 Hz een waarde 1. Tussen 20 en 40 Hz is de bomoverdracht een factor 2 groter. Voor 40 tot 60 Hz is een verhoudingsfactor van 3 een veilige waarde.

Bij een aanstootrichting van 90° zijn de bom- en grondoverdracht vergelijkbaar tussen 10 en 20 Hz. Tussen 20 en 30 Hz is de bomoverdracht een factor 2 groter, en tussen 30 en 40 Hz een factor 4. Boven 40 Hz is de bomoverdracht 2 maal groter dan de grondoverdracht.

Figuur 53 geeft de resultaten van de metingen op 10 meter afstand. De golfsnelheid bij een aanstootrichting van 0° ligt rond de 130 m/s, en bij een aanstootrichting van 90° rond de 110 m/s.



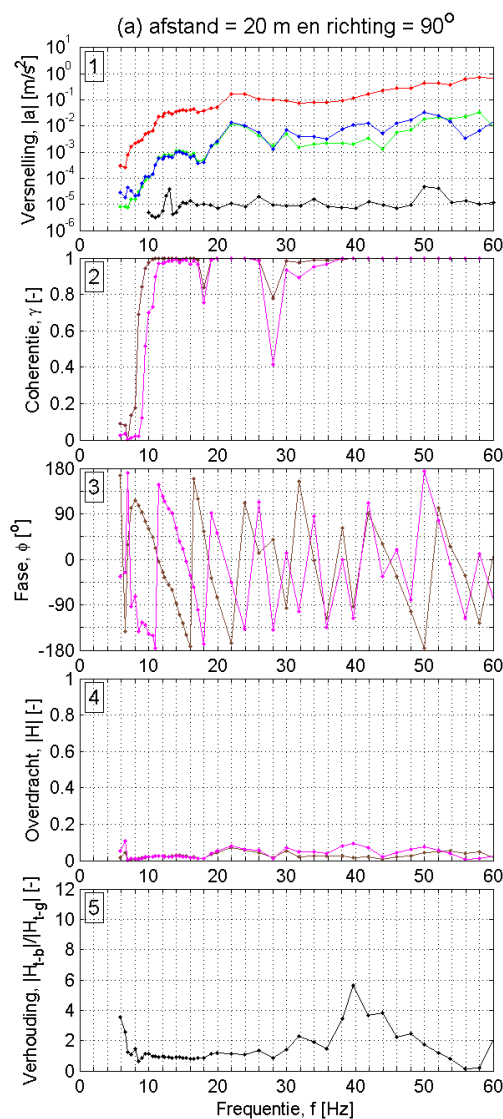
Figuur 53 Resultaten Kop van de Beer Z-component met de trilplaat op 10 meter afstand: (a) aanstootrichting is 0° en (b) aanstootrichting is 90°.

Legenda: Figuren rij 1 -- trilbron, -- grond, -- bom, -- achtergrond
 Figuren rij 2 – 4 -- trilbron – grond, -- trilbron – bom

Voor 0° aanstootrichting zijn de bom- en grondoverdracht gelijkwaardig tussen 10 en 30 Hz. De piek bij 40 Hz komt door een dip in het grondspectrum, en wordt buiten beschouwing gelaten.

Voor de frequentieband tussen 30 en 40 Hz is een factor 3 dan een veilige waarde. Boven 40 Hz is de bomoverdracht een factor 2 groter dan de grondoverdracht. Bij een aanstootrichting van 90° is de bomoverdracht vergelijkbaar met de grondoverdracht tussen 10 en 30 Hz. Boven 30 Hz is de bomoverdracht een factor 2 groter.

Figuur 54 geeft de resultaten van de metingen met de trilplaat op 20 meter afstand bij een aanstootrichting van 90°. De golfsnelheid ligt rond de 90 m/s.



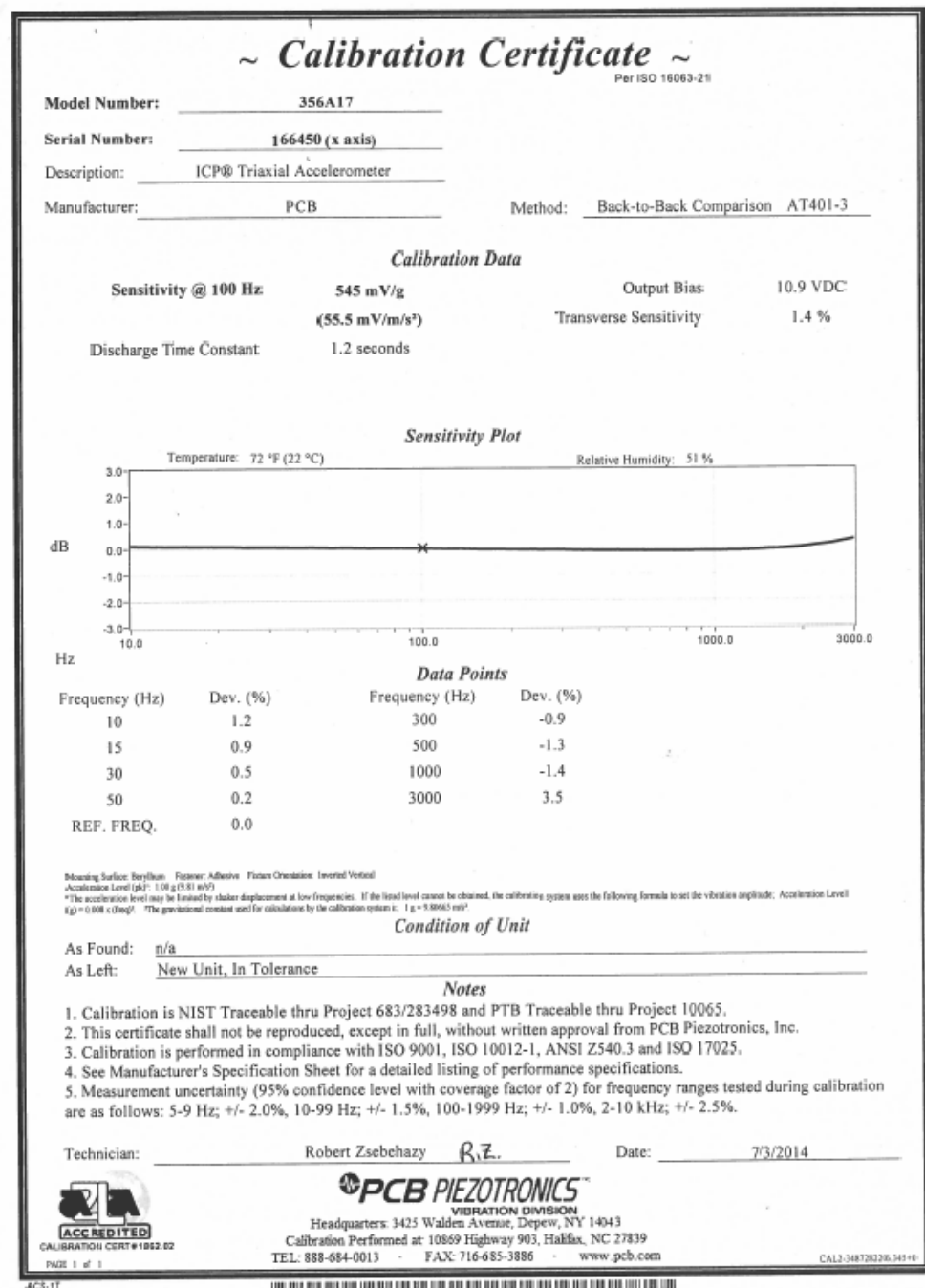
Figuur 54 Resultaten Kop van de Beer Z-component met de trilplaat op 20 meter afstand: (a) aanstootrichting is 0° en (b) aanstootrichting is 90°.

Legenda: Figuren rij 1 -- trilbron, -- grond, -- bom, -- achtergrond
 Figuren rij 2 – 4 -- trilbron – grond, -- trilbron – bom

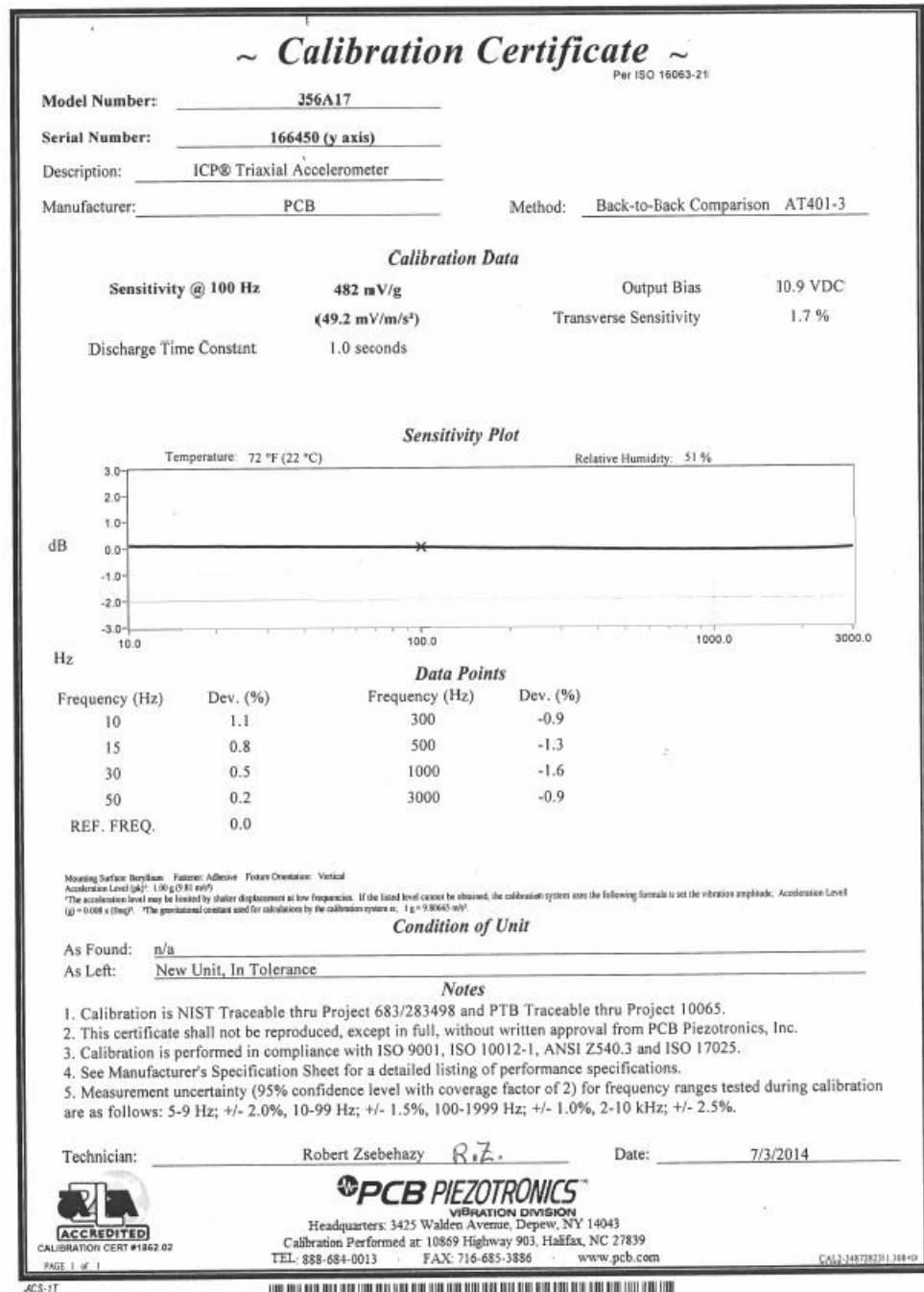
Tussen 10 en 30 Hz zijn de bom- en grondoverdracht vergelijkbaar. Boven 30 Hz is de bomoverdracht een factor 4 groter. De piekwaarde van 6 bij 40 Hz wordt buiten beschouwing gelaten omdat deze gerelateerd is aan een daling in het grondspectrum.

E Kalibratiegegevens versnellingsopnemers

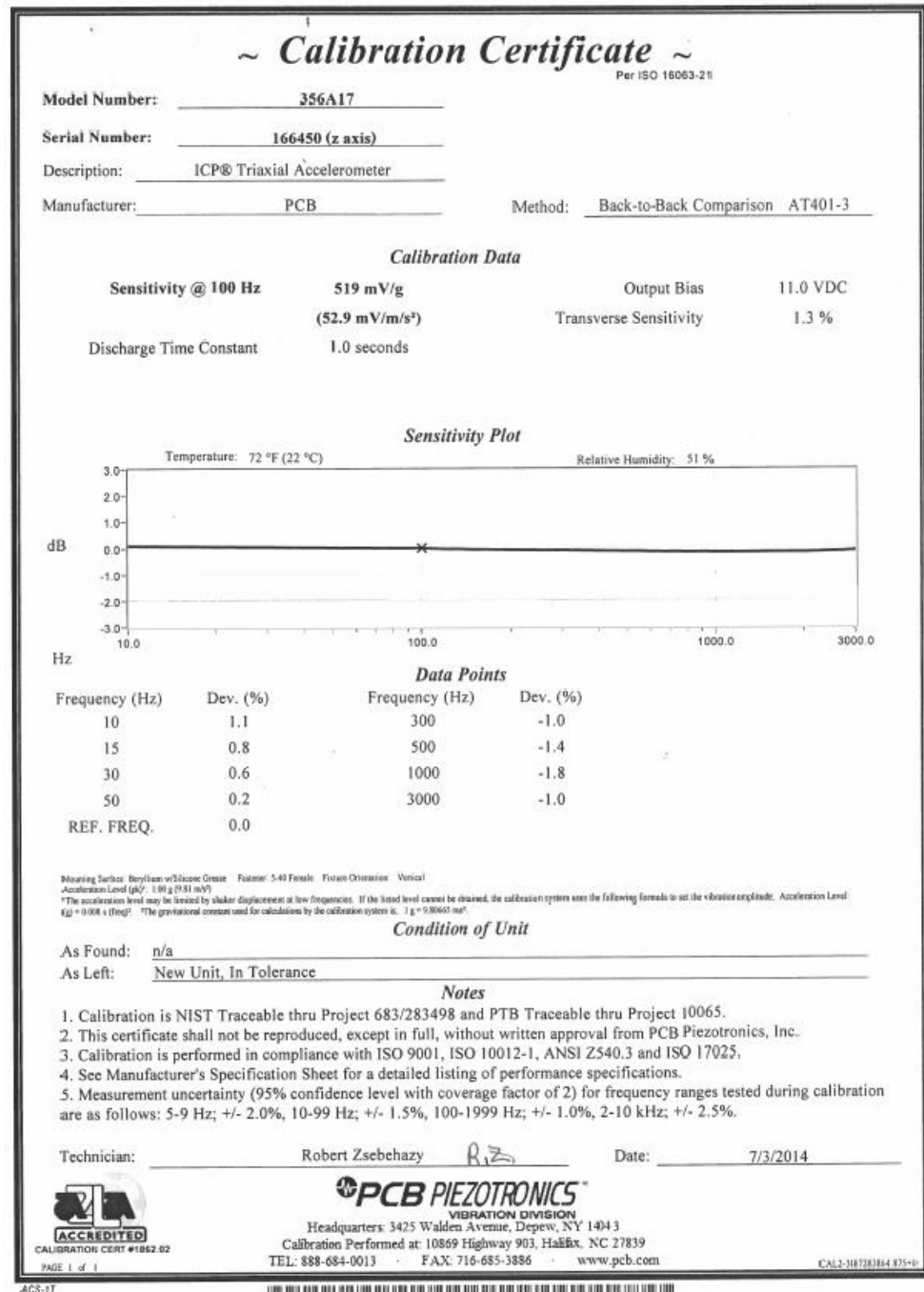
Figuur 55 tot en met Figuur 60 presenteert de kalibratie gegevens van de ICP versnellingsopnemers.



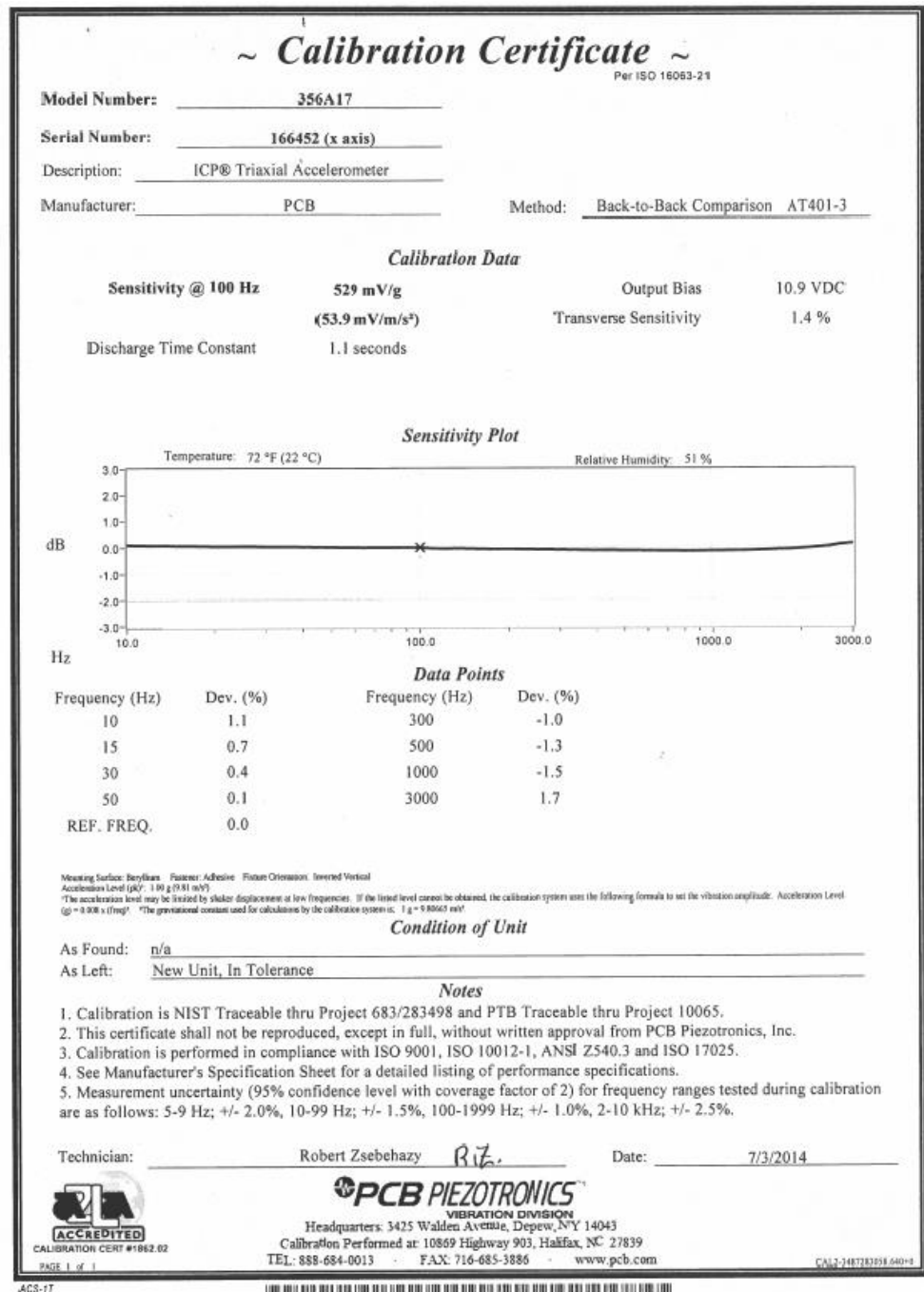
Figuur 55 Kalibratie certificaat ICP Triaxial Accelerometer, x-as; gebruikt in bom op locatie Zestienhoven.



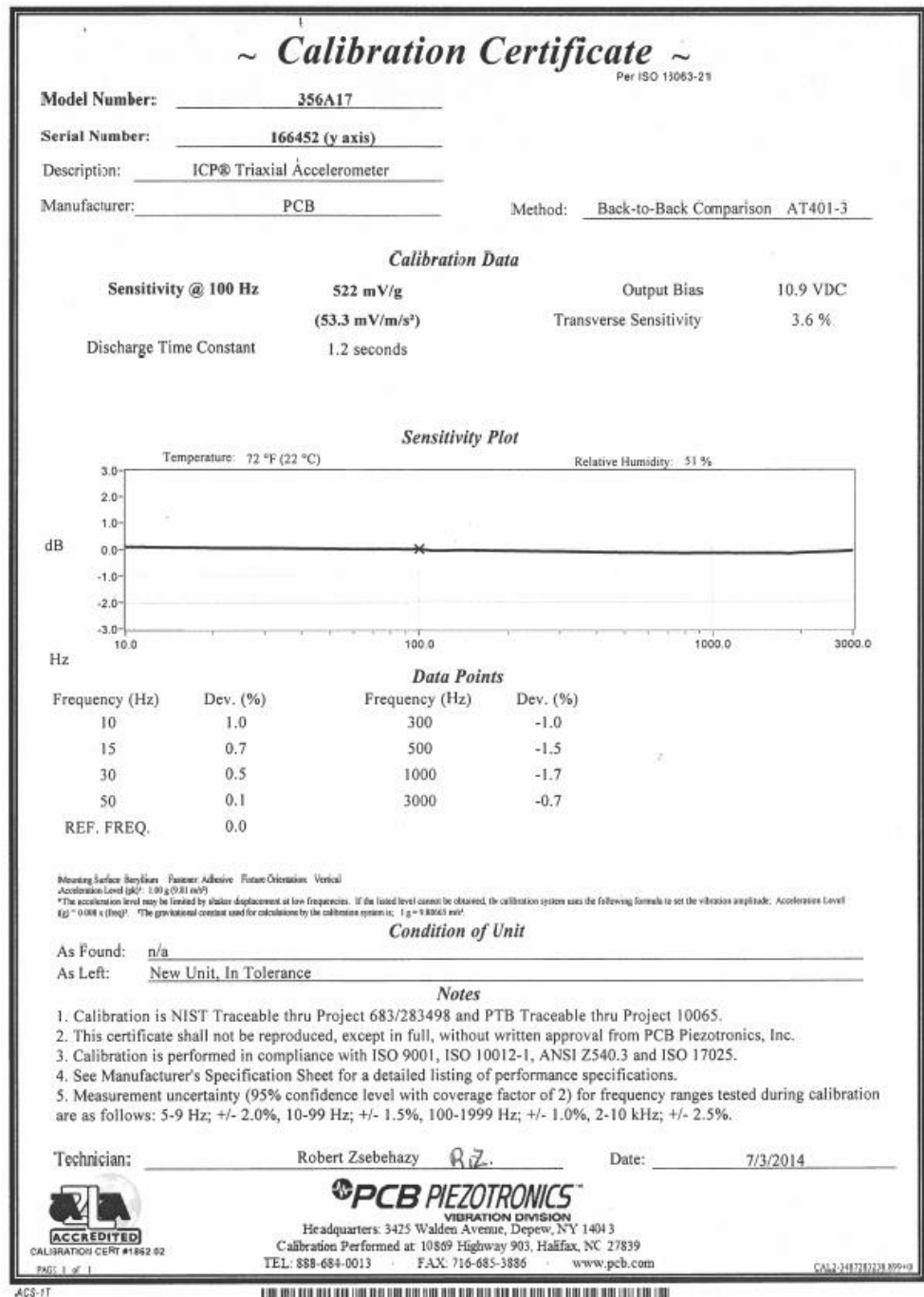
Figuur 56 Kalibratie certificaat ICP Triaxial Accelerometer, y-as; gebruikt in bom op locatie Zestienhoven.



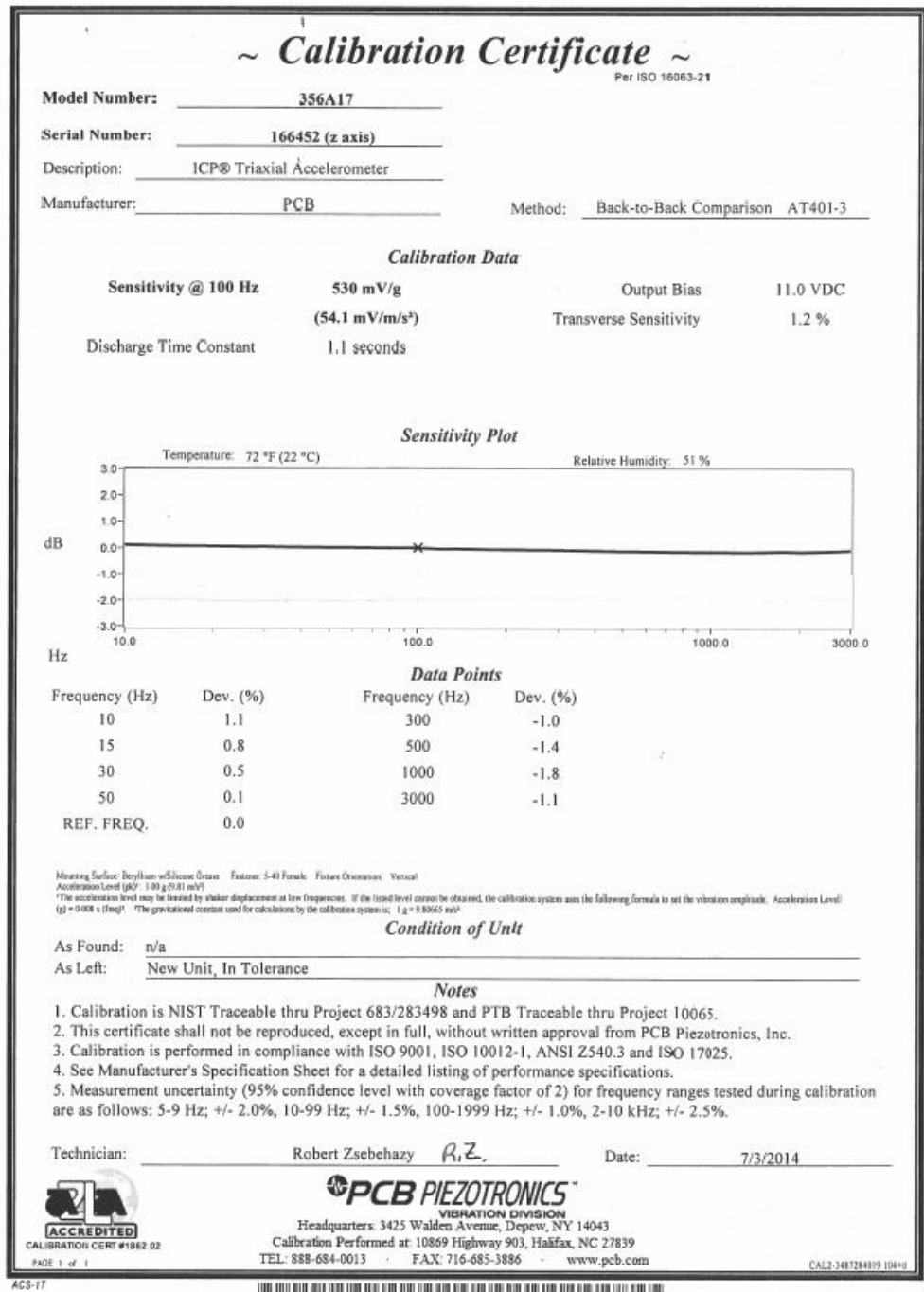
Figuur 57 Kalibratie certificaat ICP Triaxial Accelerometer, z-as; gebruikt in bom op locatie Zestienhoven.



Figuur 58 Kalibratie certificaat ICP Triaxial Accelerometer, x-as; gebruikt in bom op locatie Kop van de Beer.



Figuur 59 Kalibratie certificaat ICP Triaxial Accelerometer, y-as; gebruikt in bom op locatie Kop van de Beer.



Figuur 60 Kalibratie certificaat ICP Triaxial Accelerometer, z-as; gebruikt in bom op locatie Kop van de Beer.

