



TNO-rapport 0910-0216

Holland In-Situ Proeftuin (HIP) Programma

Pilot 'Akoestisch Saneren': Evaluatie van het optreden van mobilisatie van NAPL fasen

**Bodem- en
Grondwatersystemen**

Princetonlaan 6
Postbus 80015
3508 TA Utrecht

www.tno.nl

T +31 30 256 42 56

F +31 30 256 44 75

info-BenO@tno.nl

Datum	23 oktober 2009
Auteur(s)	Dr. Niels Hartog Drs. Rogier Westerhoff
Opdrachtgever	TNO Bouw en Ondergrond
Projectnummer	092.69225/01.01
Aantal pagina's	47 (incl. bijlagen)
Goedgekeurd door	Ing. Hans van Duijne

Alle rechten voorbehouden. Niets uit dit rapport mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke 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 onderzoeksopdrachten 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.

© 2009 TNO

Inhoudsopgave

	Lijst van tabellen en figuren	4
1	Inleiding	7
1.1	Aanleiding.....	7
1.2	Achtergrond	7
1.3	Doel.....	8
2	Achtergrond Akoestische Methode	9
2.1	Trilnaald als bron	9
2.2	Ontvangers	9
3	Locatie Botlek.....	11
3.1	Methoden	11
3.2	Resultaten Botlek	14
3.3	Discussie en Conclusies Botlek	18
4	Locatie Doetinchem	21
4.1	Methoden	22
4.2	Resultaten Doetinchem	23
4.3	Discussie en Conclusies Doetinchem	30
5	Algemene Discussie en Conclusies	33
6	Referenties	35
	Bijlage(n)	
	A Resonantieplots	
	B Resonantiefrequenties in Nederland	

Lijst van tabellen en figuren

Tabellen

Tabel 1	Opnameparameters Doetinchem. Alle opnames zijn met 4 ms opname interval en 22528 samples uitgevoerd. Totale opname tijd per opname is 90.112 seconden.	233
Tabel 2	Posities van de geofoons en peilbuizen ten opzichte van de trilnaald	233
Tabel 3	VOCl concentraties tijdens trillexperiment op de locatie Doetinchem....	273

Figuren

Figuur 1:	Het frequentiebereik van verschillende typen golven. Akoestische golven spannen het bereik van grofweg 20 Hz tot 20KHz (http://www.wikipedia.com).....	93
Figuur 2:	Gebruikte trilnaald voor de Botlek en Doetinchem locaties.....	103
Figuur 3:	Overzicht van de onttrekkingsfilters op de Botlek locatie (Haskoning, 2003). Strengen 15 en 16 zijn tijdens het trillexperiment onttrokken. Het gearceerde deel geeft ruwweg de verspreiding van de verontreiniging met minerale olie weer.	113
Figuur 4:	Overzicht van de oude peilbuizen op de Botlek locatie (Haskoning 2003). Strengen 15 en 16 zijn tijdens het trillexperiment onttrokken. Voor het trillexperiment zijn nieuwe peilbuizen geplaatst in de buurt van peilbuis "MP33". Deze peilbuis is als enige oude peilbuis meegenomen in de bemonsteringsrondes.	123
Figuur 5:	Overzicht van de grondwaterbemonsterings- en trilperiodes.	143
Figuur 6:	Amplitude van signaal en ruis als functie van de afstand ("offset") tot de trilnaald. Amplitudes zijn weergegeven in dB relatief t.o.v. 1 μ V.	143
Figuur 7:	Amplitude van signaal als functie van de afstand tot de trilnaald en de verwachte amplitude afname voor voortplanting door middel van oppervlaktegolven (SQRT) dan wel ruimtegolven (Linear). Amplitudes zijn weergegeven in dB relatief t.o.v. 1 μ V.....	153
Figuur 8:	Amplitude van signaal als functie van de diepte in peilbuis 1 en 2. Amplitudes zijn weergegeven in dB relatief t.o.v. 1 μ V.....	163
Figuur 9:	Initiële ruimtelijke verdeling concentraties BTEX (links) en het totaal aan minerale olie componenten (C6-C40).	173
Figuur 10:	Verloop in totale concentratie aan olie componenten (C6—C40) voor de verschillende peilbuizen voor en tijdens het trillexperiment op de Botlek locatie.	183
Figuur 11:	Verloop in totale BTEX concentratie voor de verschillende peilbuizen voor en tijdens het trillexperiment op de Botlek locatie.	183
Figuur 12:	Doetinchem locatie met de concentratie contouren (grondwater 0-5 m beneden maaiveld) en de geselecteerde peilbuizen en voor het trillexperiment.	213
Figuur 13:	Overzicht van de ligging van de peilbuizen in relatie tot de positie van de trilnaald en de lijn met geofoons waarlangs de trillingen zijn gemeten.	223

Figuur 14	Resonantiefrequentie van metingen tijdens relatieve stilte (ambient noise) op de onderzoekslocatie, waaruit blijkt dat de resonantiefrequentie van de ondergrond op de onderzoekslocatie tussen 11 en 13 Hz ligt.....	243
Figuur 15	Spectrale amplitudes per gefoons voor opname 6, waar de trilnaald met ca. 96 Hz trilt.	253
Figuur 16	Spectrale amplitudes per gefoons voor opname 5, waar de trilnaald met ca. 48 Hz trilt.	253
Figuur 17	Amplitudes van de verschillende opnames, gerefereerd aan de achtergrondwaardes. Links de gemeten maximale amplitude in het signaal. Rechts het gewogen totale trillingsignaal ten opzichte van de achtergrond.	263
Figuur 18:	Per, Tri en cis-DCE concentraties gedurende de dag voor peilbuis 1. De labels geven aan bij welke trilfrequentie actief was op het tijdstip van bemonstering.	283
Figuur 19:	Per, Tri en cis-DCE concentraties gedurende de dag voor peilbuis 2. De labels geven aan bij welke trilfrequentie actief was op het tijdstip van bemonstering.	293
Figuur 20:	Per, Tri en cis-DCE concentraties gedurende de dag voor peilbuis 3. De labels geven aan bij welke trilfrequentie actief was op het tijdstip van bemonstering.	303
Figuur 21	Resonantiefrequenties op de Botlek locatie. De grafieken in de linkerkolom tonen resonantie in oost-west richting (linksboven), noord-zuid-richting (linksmidden) en verticale richting (linksonder). De grafieken in de rechterkolom geven aan dat er weinig verschil is in horizontale en bodembeweging.	23

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Tijdens het saneren met behulp van twee-fasenextractie viel het HMVT op dat er tot 10 keer verhoogde concentraties in grondwater aan oliecomponenten werden onttrokken op momenten dat er op locatie sonisch (met 200 Hz) geboord werd (*sonic drilling*). Dit leidde tot de gedachte dat door het in trilling brengen van de bodem, NAPL¹ fasen gemobiliseerd kon worden. De potentiële techniek die op basis van dit mechanisme verbeterde verwijdering van verontreinigingen mogelijk kan maken werd de naam “Akoestisch Saneren” gegeven.

1.2 Achtergrond

Veel gevallen van bodemverontreiniging betreffen locaties die verontreinigd zijn met drijf- of zaklagen van NAPL. Drijf- of zaklagen bestaan uit LNAPL, met een lagere dichtheid dan water, DNAPLs hebben een hogere dichtheid dan water. Zo is benzine een bekend voorbeeld van een LNAPL en zijn de gechloreerde oplosmiddelen Tri en Per bekende DNAPLs. Aangezien NAPL fasen zeer slecht oplosbaar zijn in water, zijn deze pure fasen als druppels in de bodemporiën aanwezig. De mate waarin deze druppels het aanwezige porievolume tussen de korrels van de bodemmatrix innemen wordt de porieverzadigingsgraad genoemd. Afhankelijk van de verontreinigingsgeschiedenis en de bodemeigenschappen kan de porieverzadigingsgraad <10% (residuaire) tot 100% (verzadigd) bedragen. Het is de ervaring dat het saneren van deze NAPL in de bodem op basis van conventionele pump-and-treat tientallen jaren kan duren. Als deze fasen versneld kunnen worden opgelost of zelfs gemobiliseerd, dan zouden deze sneller verwijderd kunnen worden.

In de oliewinningsindustrie is al decennia lang interesse in en doet men bescheiden onderzoek naar het mobiliseren van oliefase in reservoirs door trillingen ten behoeve van het effectiever winnen van aardolie. Dit gebeurt naar aanleiding van de observatie van mobiliserende effecten op olievoorraden ten gevolge van aardbevingen en explosies. De effectiviteit van het mobiliseren van olievoorraden (“Enhanced Oil Recovery”) door het toepassen van trillingen is echter in het veld nog niet overtuigend vastgesteld (Kostrov and Wooden, 2005).

Meer recentelijk is er internationaal vanuit de milieugeoriënteerde wetenschap ook aandacht voor de mogelijkheden die dit principe zou kunnen hebben voor de verbetering van de extractie van verontreinigende NAPL fasen in de bodem als bijvoorbeeld minerale olie of perchloroethylene (Per). In de recente internationale wetenschappelijke literatuur tonen labstudies geen mobilisatie, maar wel versterkte oplossing van NAPL fasen aan (Chrysikopoulos and Vogler, 2004; Kim and Wang, 2003; Vogler and Chrysikopoulos, 2004). Geen van de gevonden studies richten zich op het aantonen van de effecten van akoestische stimulatie in het veld.

¹ NAPL: Non-Aqueous Phase Liquid. Voor het doel van deze studie hanteren we de volgende definitie: een stof of mengsel van stoffen in vloeibare vorm, slecht oplosbaar in water en daardoor in een waterig milieu als aparte vloeibare fase naast water aanwezig is.

1.3 Doel

Het programma Holland In-situ Proeftuin heeft als doel bodem en grondwatersaneringen sneller en kosten-effectiever te kunnen uitvoeren door grotere en betere inzet van in-situ technieken. Het doel van deze HIP-pilot was om het “*Proof of Principle*” van de techniek “Akoestisch Saneren” te testen. Bij deze techniek wordt geprobeerd door middel van akoestische golven de mobilisatie van verontreiniging in de bodem te stimuleren. Met mobilisatie wordt hier bedoeld: “*Het in de stroombaan van het grondwater brengen van onopgeloste NAPL druppels in de bodem zodat deze met de waterstroom worden meegevoerd*”

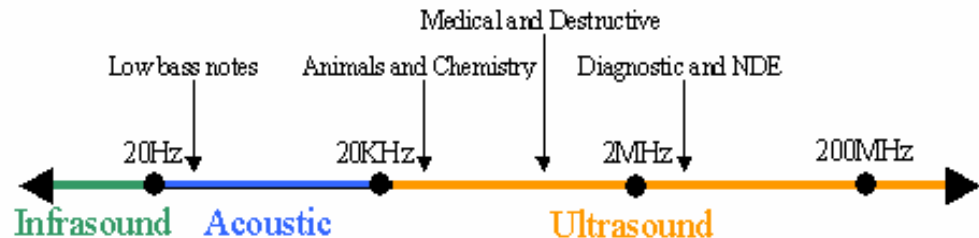
Het onderzoek werd in twee fasen uitgevoerd:

1. In de eerste fase werd de invloedssfeer van trillingen vastgesteld en of ten gevolge van trillen de beschikbaarheid van verontreinigingen werd vergroot.
2. In de tweede fase werd een aantal parameters gevarieerd, waardoor meer in detail de toepassingsmethode kon worden vastgesteld (eerste stap optimalisatie en effectiviteit).

Het uitgangspunt voor deze HIP pilot is geweest om de toepassing van trillingen te toetsen op verontreinigde locaties met verschillen in bodemopbouw en verontreinigingstype. Deze eindrapportage beschouwt de uitkomsten van de experimenten op een fijnzandige locatie met een ondiepe minerale olieervuiling (Botlek locatie) en op een grofzandige locatie met een VOCl verontreiniging op diepte.

2 Achtergrond akoestische methode

Hieronder wordt de op beide locaties gebruikte akoestische methode algemeen beschreven. De condities van de toepassing verschilt op detailniveau tussen beide locaties en wordt bij de locaties apart beschreven.



Figuur 1: Het frequentiebereik van verschillende typen golven. Akoestische golven spannen het bereik van grofweg 20 Hz tot 20kHz (<http://www.wikipedia.com>).

2.1 Trilnaald als bron

Voor het genereren van de trilling wordt gebruik gemaakt van een standaard trilnaald zoals deze normaal gebruikt wordt voor de verdichting van beton. De trilnaald functioneert standaard op een vaste, akoestische frequentie van 200 Hz (Figuur 1, 12,000 toeren per minuut). De trilnaald wordt via een omvormer aangesloten op een standaard 240V – 50 Hz voeding. De trilnaald bestaat uit een ronddraaiende klepel in een cilindrische behuizing (Figuur 2). Door de klepel met hoge snelheid te roteren slaat deze tegen de behuizing en genereert daarmee een sterke trilling in het akoestische bereik. Voor het bestuderen van het gedrag van de trillingen in de bodem zijn seismische ontvangers gebruikt.

2.2 Ontvangers

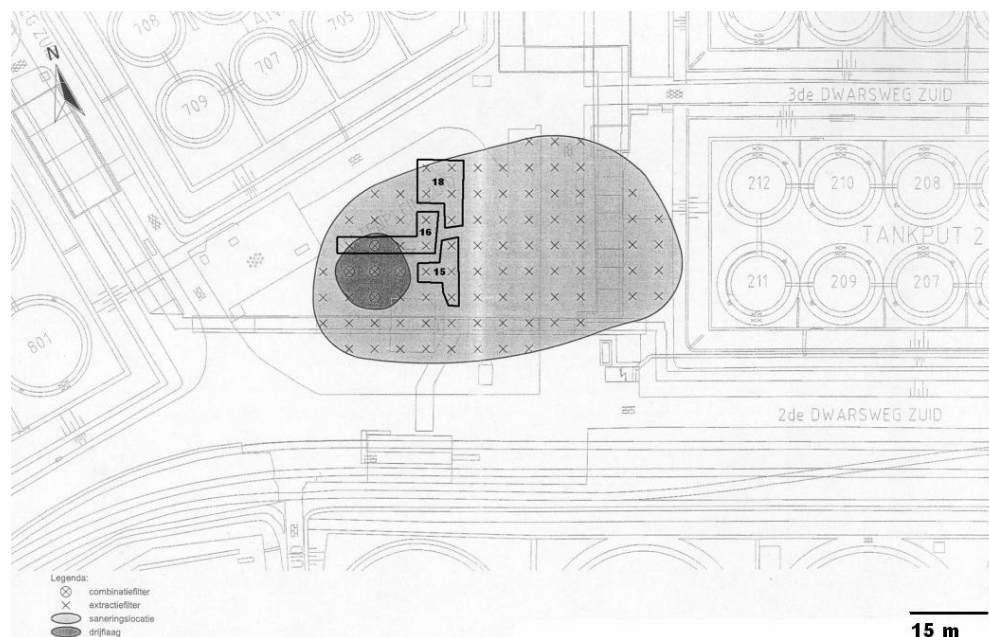
Voor de waarneming van de trillingsintensiteit is gebruik gemaakt van een tweetal types trillingssensoren, te weten bewegingssensoren (gefoons), geplaatst aan het maaiveld en druksensoren (hydrofoons) geplaatst in peilbuizen. De gefoons registreren een vectorgrootheid (deeltjessnelheid en richting) en bestaan daartoe uit een drietal onderling loodrecht geplaatste bewegingssensoren. De hydrofoons registreren een scalaire grootheid (drukverstoring) en kennen geen richtingsafhankelijkheid. De sensoren transformeren de drukverstoring respectievelijk deeltjessnelheid naar een (elektrische) spanningsvariatie in de tijd. Voor de hydrofoons bestaat een directe relatie tussen geregistreerde amplitude en druk, deze is 25V/bar. De door de seismische sensoren waargenomen spanningsvariatie worden met een seismograaf geregistreerd en opgeslagen als functie van de tijd.



Figuur 2: Gebruikte trilnaald voor de Botlek en Doetinchem locaties.

3 Locatie Botlek

De eerste locatie is gelegen in de Botlek. Hier bevindt zich een minerale olie verontreiniging in een opgebrachte laag bestaande uit fijn zand. Hannover Milieu- en Veiligheidstechniek (HMVT) voert hier sinds 2006 een grondwaterextractie uit, waarbij zowel in het grondwater opgeloste verontreiniging als pure fase wordt verwijderd door middel van strengen van extractiefilters (Figuur 3). Uit voorgaand onderzoek blijkt dat de minerale olie verontreiniging zich deels bevindt als (lokale) drijfslag op de grondwaterspiegel en deels als disperse druppeltjes in de poriën in het zand onder de grondwaterspiegel (Figuur 4).

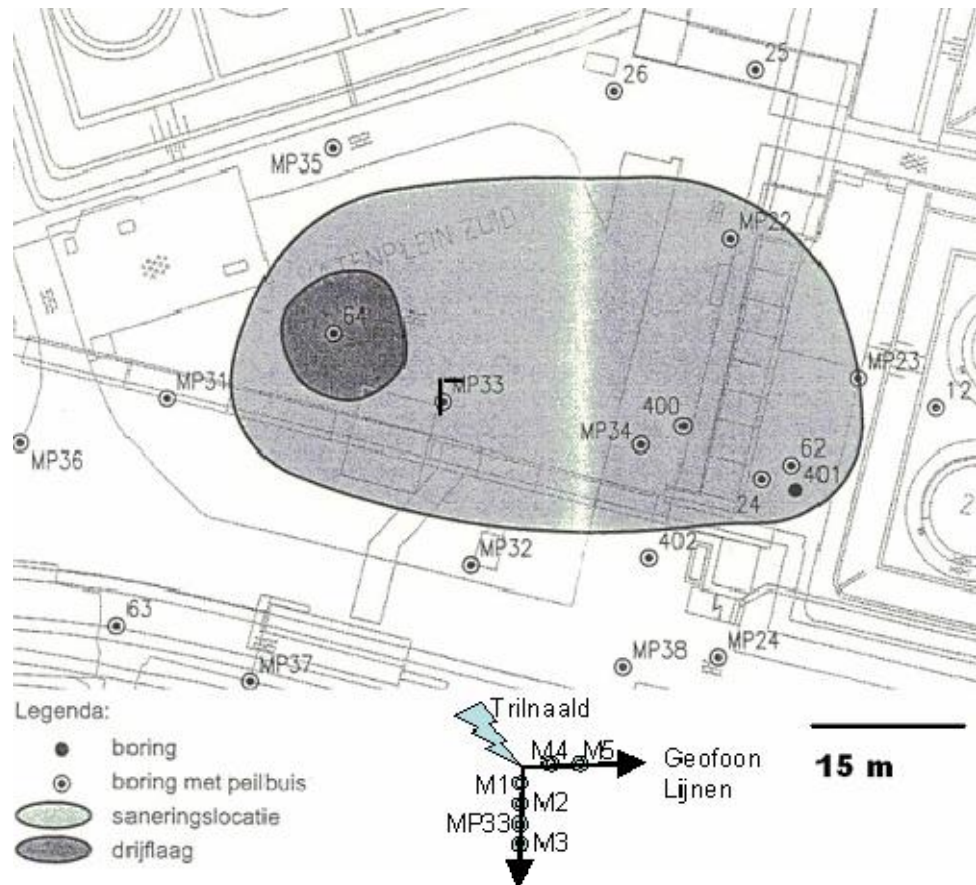


Figuur 3: Overzicht van de otrekkingsfilters op de Botlek locatie (Haskoning, 2003). Via strengen 15 en 16 is tijdens het trilexperiment grondwater onttrokken. Het gearceerde deel geeft ruwweg de verspreiding van de verontreiniging met minerale olie weer.

3.1 Methoden

3.1.1 Akoestische condities

Op de Botlek locatie is de voortplanting van de akoestische trilling in de bodem en het effect op de chemie van het grondwater geëvalueerd. De trilnaald is met korte tussenpozen gedurende enkele uren actief geweest. Zowel tijdens het trillen als tijdens perioden van rust is de seismische activiteit in de onmiddellijke nabijheid van de trilnaald gemeten. De naald werd op een diepte van ca. 1,5 m onder maaiveld in de bodem aangebracht en vervolgens geactiveerd. Tijdens het gebruik van de trilnaald bleek dat door het langdurig aaneengesloten gebruik de trilnaald zich steeds dieper in de bodem werkte, tot maximaal ca. 2,5 m onder maaiveld. Als gevolg hiervan bleek ook de trillingsintensiteit te veranderen. Nadat de trilnaald op een vaste diepte was gefixeerd bleken de metingen gedurende de rest van dag goed reproduceerbaar.



Figuur 4: Overzicht van de oude peilbuizen op de Botlek locatie (Haskoning 2003). Via strengen 15 en 16 is tijdens het trilexperiment grondwater onttrokken. Voor het trilexperiment zijn nieuwe peilbuizen geplaatst in de buurt van peilbuis "MP33". Deze peilbuis is als enige oude peilbuis meegenomen in de bemonsteringsrondes.

3.1.2 Data acquisitie en verwerking

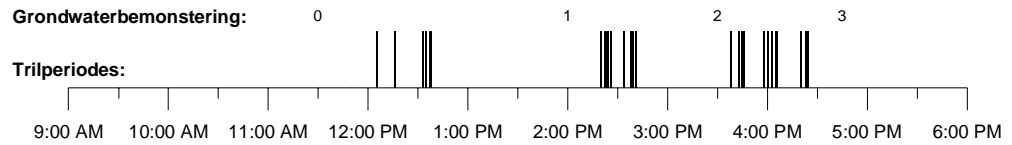
Bij het Botlek experiment is gebruik gemaakt van SUMMIT seismisch opnamesysteem. Op 20 november 2006 zijn gedurende één dag een aantal meetsessies uitgevoerd waarbij waarnemingen zijn gedaan van de seismische activiteit in het meetgebied, zowel tijdens gebruik van de trilnaald als in rust. Per meetsessie is de seismische activiteit bepaald op alle aanwezige sensoren. Hierbij zijn per meetsessie per sensor minimaal vier herhalingswaarnemingen uitgevoerd met ingeschakelde bron en in rust. Bij elke waarneming is gedurende een aantal seconden het seismische signaal geregistreerd en opgeslagen. De metingen met uitgeschakelde trilnaald dienden hierbij om de van nature aanwezige achtergrondruis te kwantificeren. Metingen aan het oppervlak met behulp van gefoons zijn uitgevoerd in twee onderling loodrechte richtingen op afstanden van respectievelijk 1, 2, 4, 8 en 16 m vanaf de trilnaald. Metingen in een tweetal peilbuizen op horizontale afstanden van 0,5 en 1,5 m ten opzichte van de trilnaald zijn uitgevoerd op onderlinge verticale afstanden van 1 m.

Per sessie is van iedere sensor de gemiddelde trillingsintensiteit over de vier herhalingsmetingen bepaald. Hierbij is alleen gekeken naar de trillingsintensiteit bij 200 Hz (het door de trilnaald uitgestuurde signaal) door het toepassen van een nauwbandig frequentie filter. De 3 door de gefoons gemeten loodrechte bewegingsrichtingen zijn per locatie samengevoegd tot een totale seismische intensiteit.

3.1.3 *Bemonstering Grondwater*

Ten bate van de monitoring van het trillexperiment zijn, 10 dagen voor aanvang van het trillexperiment, 5 nieuwe peilbuizen snijdend met de grondwaterspiegel geplaatst (M1—M5). Tevens is een oude peilbuis (MP-33) opgenomen in de bemonsteringsrondes. Grondwater is in 4 rondes bemonsterd (Figuur 5). Grondwaterstanden bij aanvang zijn circa 1,5m beneden maaiveld.

De eerste ronde heeft plaatsgevonden voordat er met trillen begonnen werd. Daarna vond bemonstering plaats gedurende de dag om de paar uur, na elke trilperiode (Figuur 5). Bij elke bemonstering werd gecontroleerd op de vorming van een drijfslag. Een drijfslag werd geen enkele keer aangetroffen. De analysesresultaten voor deze ronde worden als referentie gebruikt om de resultaten uit de volgende rondes te vergelijken. De volgende 3 rondes vonden elk plaats nadat er een trilperiode had plaatsgevonden. Om een representatief grondwatermonster te kunnen nemen werd tijdens elke peilbuisbemonstering eerst het volume van de peilbuis doorgespoeld (20-30 L). Drie divers waren geplaatst om grondwaterstanden te monitoren in peilbuizen M1, M3 (halverwege de dag verhangen naar MP33) en in peilbuis 64 als achtergrond, aangezien deze niet bemonsterd werd en verder (+/- 20 m) van het trillingspunt af lag. Door de grondwater bemonstering van de peilbuizen M1, M3/MP33 werd de grondwaterspiegel met respectievelijk maximaal 0,2 m en 1 m verlaagd. In de referentiepeilbuis 64 varieerde de grondwaterstand maximaal 5 cm gedurende de dag. De aanwezigheid van een drijfslag werd tijdens elke meetronde per peilbuis getoetst met behulp van een drijfslagmeter en grondwatermonsters (24 stuks) zijn verstuurd naar AL-West voor analyse op oliecomponenten.

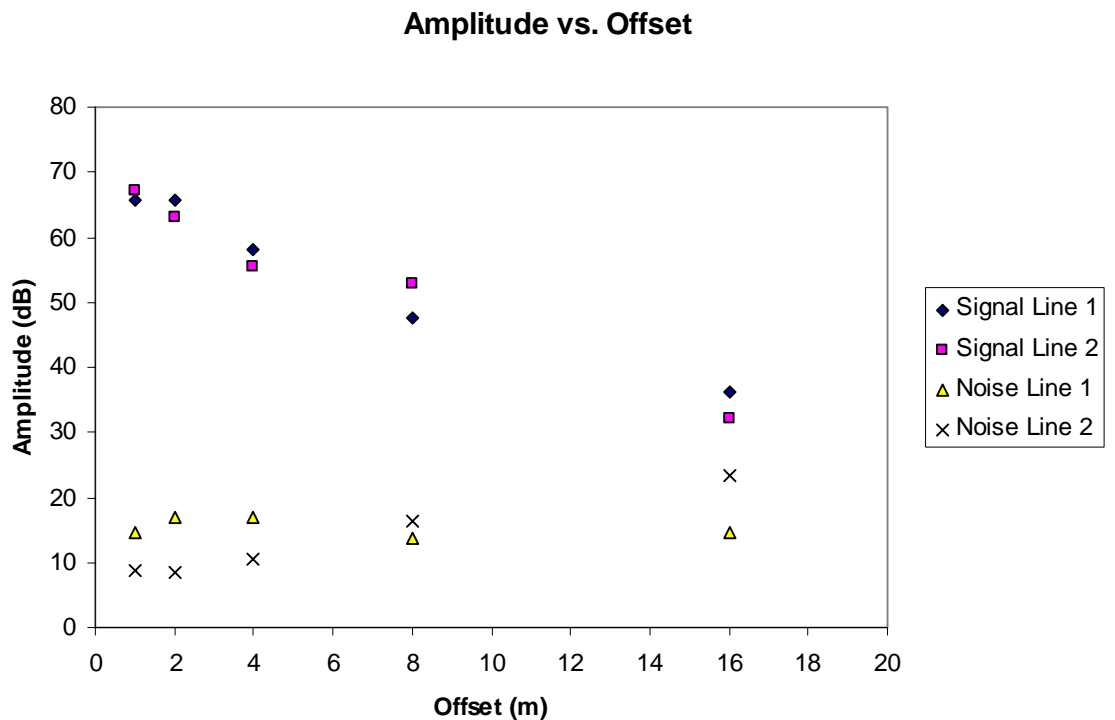


Figuur 5: Overzicht van de grondwaterbemonsterings- en trilperiodes.

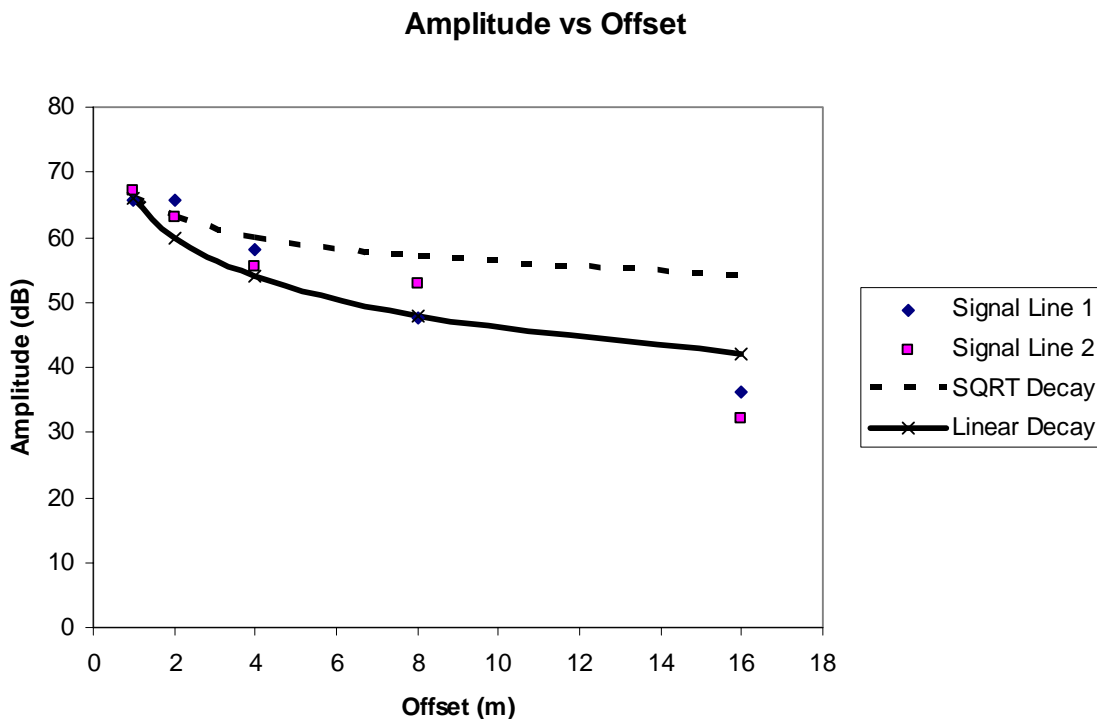
3.2 Resultaten Botlek

3.2.1 Akoestiek

Om na te gaan in hoeverre het signaal van de trilnaald op grotere afstand nog valt waar te nemen is per ontvangerlocatie over alle meetsessies de gemiddelde signaalamplitude en de gemiddelde ruisamplitude bepaald in oostelijke richting langs peilbuis M4 en M5 en in zuidelijke richting langs M1, M2, MP33 en M3 (Signal Line 1 en 2). In dezelfde richtingen is ook de achtergrondruis gemeten (Noise Line 1 en 2). In verband met de grote verschillen in signaal en ruissterkte is er voor gekozen deze amplitudes in dB weer te geven. Resultaten zijn gepresenteerd in Figuur 6 en geven een signaal-ruis verhouding te zien van ca. +55 dB op 1 meter van de trilnaald (factor 50) tot ca. +25 dB op 16 meter van de trilnaald (factor 2).



Figuur 6: Amplitude van signaal en ruis als functie van de afstand ("offset") tot de trilnaald. Amplitudes zijn weergegeven in dB relatief t.o.v. 1 μ V.

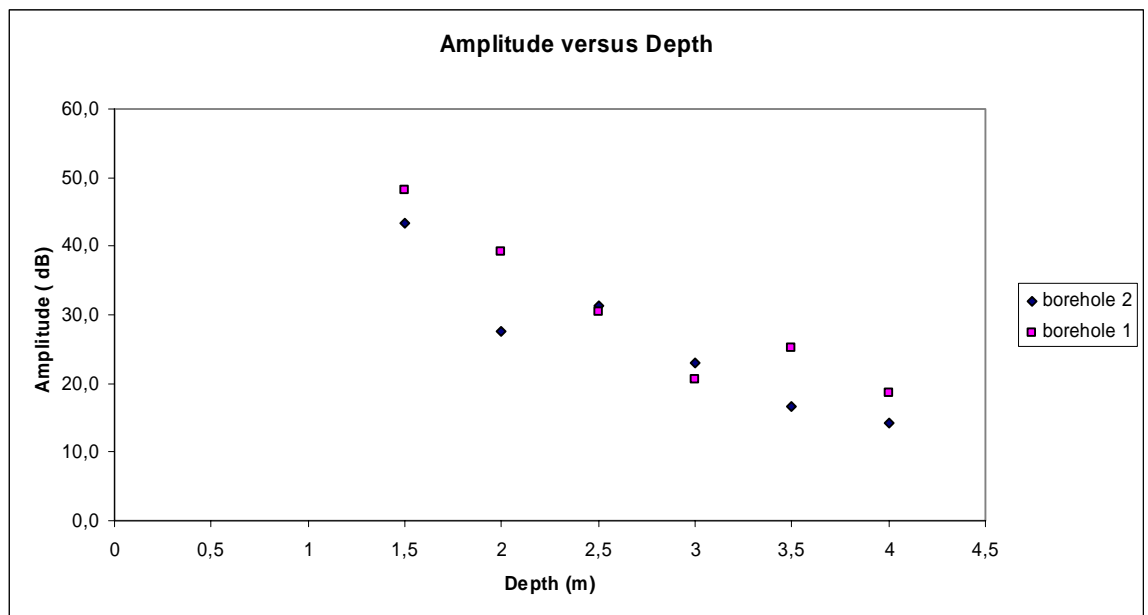


Figuur 7: Amplitude van signaal als functie van de afstand tot de trilnaald en de verwachte amplitude afname voor voortplanting door middel van oppervlaktegolven (SQRT) dan wel ruimtegolven (Linear). Amplitudes zijn weergegeven in dB relatief t.o.v. 1 μ V

In Figuur 7 is naast de afname van de signaal amplitudes langs de twee meetprofielen ook de verwachte amplitude afname voor oppervlaktegolven (SQRT) en ruimtegolven (LINEAR)² weer gegeven. Duidelijk wordt dat de waargenomen amplitude afname eerder het gedrag van ruimtegolven vertoont dan dat van oppervlaktegolven, met daarnaast wellicht nog een extra niet elastische afname als gevolg van demping van het signaal.

De in de peilbuizen waargenomen amplitudes zijn weergegeven in Figuur 8. De metingen in de peilbuizen tonen een signaal-ruis verschil vergelijkbaar met die van de metingen aan het oppervlak. Voor peilbuis 1 wordt een signaal/ruis verhouding van 55 dB op 1,5 meter diepte gevonden afnemend tot 20 dB op 4 m diepte. Voor peilbuis 2 worden als gevolg van de grotere laterale offset een waarde gevonden van 50 dB op 1,5 meter diepte. Bijlage A.2 gaat geeft meer achtergronden van de resonantiemetingen op de Botlek locatie.

² SQRT betekent een afname van de amplitude met een factor van $R^{-1/2}$, terwijl LINEAR staat voor een afname met R^{-1} . Hierbij staat R voor de afstand van het bronsignaal.



Figuur 8: Amplitude van signaal als functie van de diepte in peilbuis 1 en 2. Amplitudes zijn weergegeven in dB relatief t.o.v. 1 μ V

Op de Botlek locatie is met behulp van een aantal ruismetingen (toen de trilnaald niet aan stond) ook een resonantiefrequentie berekend. Op drie frequenties vindt resonantie plaats, te weten op ca. 8 (bandbreedte ca. 2 Hz) Hz, op ca. 15 Hz (bandbreedte ca. 10 Hz) en 26 Hz (bandbreedte ca. 2 Hz). Het medium vertoont geen opvallende verschillen tussen horizontale en verticale bodembeweging. In Bijlage A is een uitgebreidere rapportage van de berekening van resonantie-effecten geplaatst.

3.2.2 *Drijfslag en concentraties in grondwater*

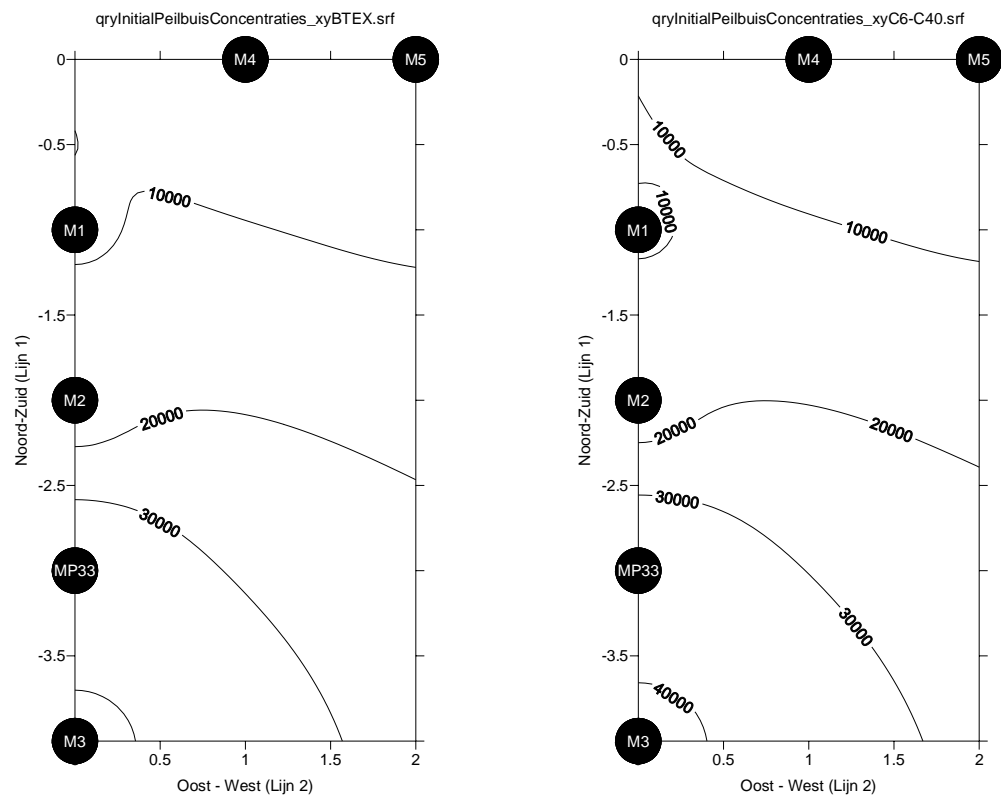
De peilbuizen M1-M5 en MP33 liggen binnen 4 meter afstand vanaf de trillingsbron en daarmee ruim binnen de waargenomen invloedstraal van de akoestische trilnaald. Als de trillingen effect hebben op opgeloste concentraties en een eventuele drijfslag, is de verwachting dus dat deze in de peilbuizen merkbaar zijn.

Er werd voor aanvang van het trillexperiment nergens op de locatie een drijfslag aangetroffen in de bemonsterde peilbuizen. Ook in peilbuis 64 werd geen drijfslag aangetroffen waar deze in eerdere onderzoeken wel aanwezig was (Figuur 3). Ook gedurende de dag werd er tussen de trillingsperiodes geen drijfslag aangetroffen in de bemonsterde peilbuizen. Op een afstand van circa 15 meter lag deze peilbuis 64 nog binnen de invloedstraal van de trillingen.

De resultaten van de gemeten concentraties in de peilbuizen lieten zien dat:

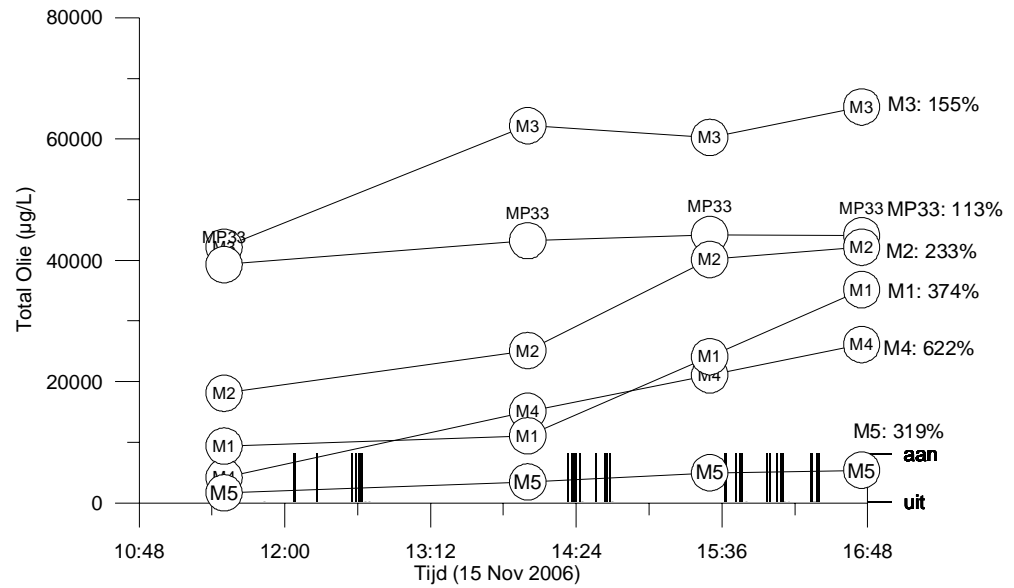
- De hoogste concentraties aan minerale olie componenten worden gevonden in MP3 en MP33, de laagste in M4 en M5 (Figuur 9).
- BTEX vormt bij aanvang 98% van het totaal aan minerale olie componenten, dit verandert niet tijdens het trillexperiment; i.e. de minder oplosbare componenten (>C10), worden niet preferent gemobiliseerd.
- Na elke trilfase/bemonsteringsfase nemen de concentraties geleidelijk toe in de peilbuizen (Figuur 10 en Figuur 11).
- De relatieve toename voor de verschillende peilbuizen ten opzichte van de beginconcentraties aan minerale olie componenten (C6-C40, Figuur 10) in

volgorde van hoog naar laag: M4 (622%), M1 (374%), M5 (319%), M2 (233%), M3 (155%). De concentraties in peilbuis MP33 steeg met 113%.

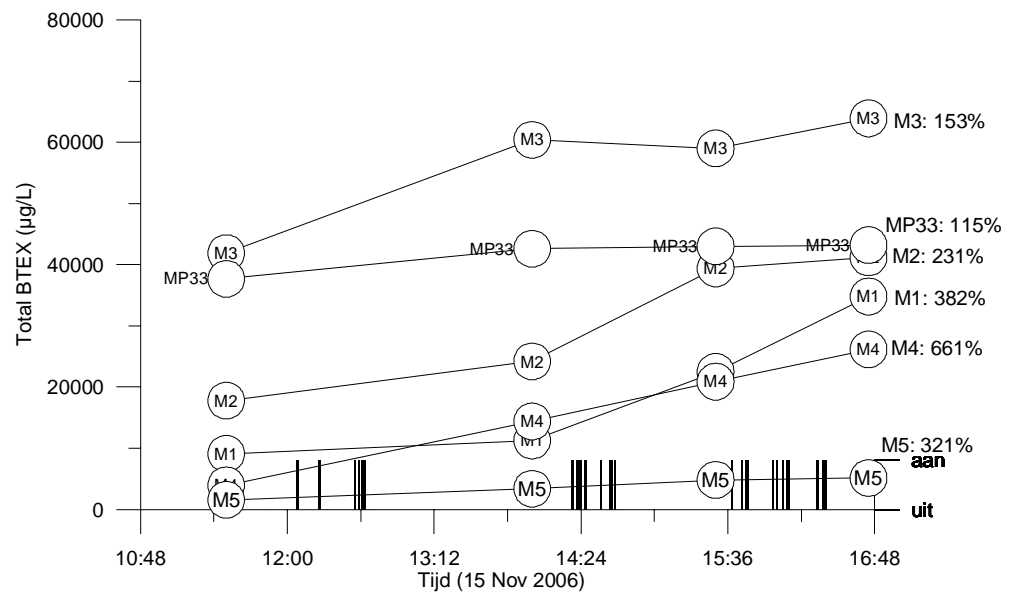


Figuur 9: Initiële ruimtelijke verdeling concentraties BTEX (links) en het totaal aan minerale olie componenten (C6-C40).

- De relatieve toename ten opzichte van de beginconcentraties aan BTEX componenten (Figuur 11) in volgorde van hoog naar laag: M4 (661%), M1 (382%), M5 (321%), M2 (231%), M3 (153%). De concentratie in peilbuis MP-33 steeg met slechts 115%.
- De in de peilbuizen waargenomen relatieve concentratietoenames van zowel BTEX als het totaal aan minerale olie componenten (C6–C40) zijn consistent met de afstand ten opzichte van de locatie van de trilnaald; i.e. de concentratietoenames zijn het sterkst voor de peilbuizen dicht bij de trilnaald.



Figuur 10: Verloop in totale concentratie aan olie componenten (C6—C40) voor de verschillende peilbuizen voor en tijdens het trilexperiment op de Botlek locatie.



Figuur 11: Verloop in totale BTEX concentratie voor de verschillende peilbuizen voor en tijdens het trilexperiment op de Botlek locatie.

3.3 Discussie en conclusies Botlek

De resultaten van het akoestisch onderzoek tonen aan dat de peilbuizen in de invloedssfeer van de trilnaald lagen. Dat de BTEX concentraties met elke trillingsperiode toenemen en de grootte omgekeerd evenredig is met de afstand tot de trillingsbron, suggereert een causaal verband. De BTEX concentraties dicht bij de trillingsbron verzesvoudigen. De tot viervoudige toename van minerale olie componenten wordt veroorzaakt door een toename van de C6-C10 componenten. De concentraties van de grotere, minder goed oplosbare, koolwaterstoffen (>C10) veranderen echter niet significant. Het is daarom niet waarschijnlijk dat er mobilisatie van oliedruppels richting de peilbuizen heeft plaatsgevonden. De concentratieverhoging

van de BTEX componenten kan veroorzaakt worden door het opbreken van oliedruppels wat het oplossingsproces versneld (Chrysikopoulos and Vogler, 2004; Vogler and Chrysikopoulos, 2004).

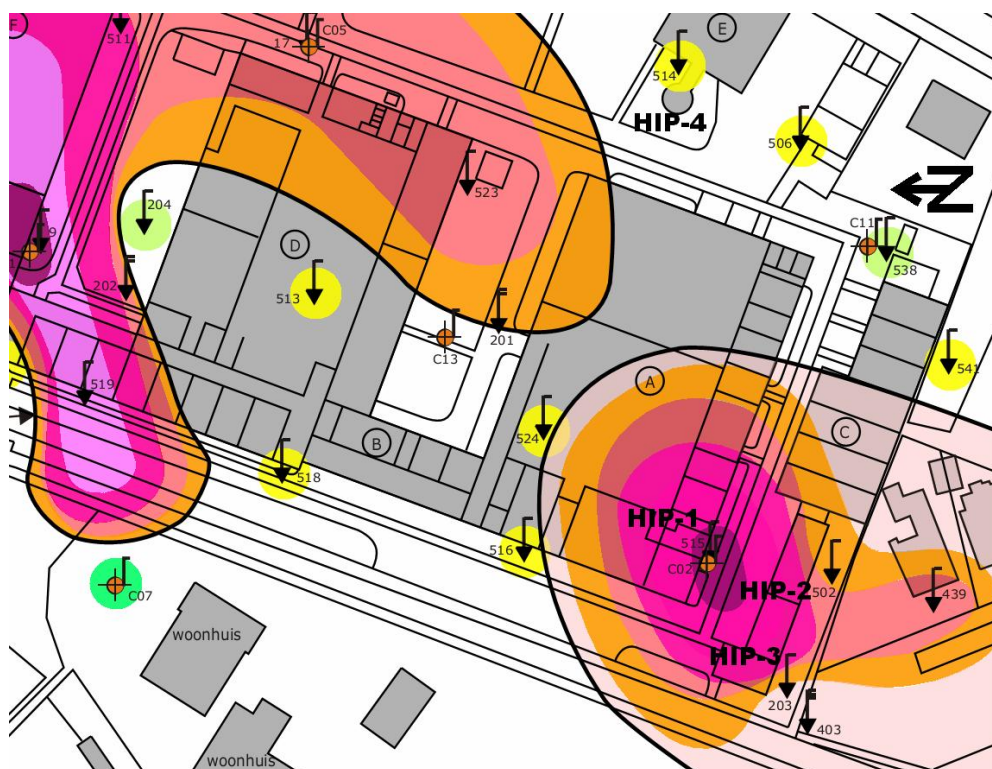
De veranderingen in concentraties tijdens de monitoring van de oude peilbuis MP33 waren minimaal in vergelijking met het verloop in de nieuw geplaatste peilbuizen (M1-M5). Een verklaring voor dit feit kan niet gegeven worden, omdat de plaatsingswijze van deze peilbuis onbekend is. Na het onderzoek op de Botlek locatie werden de volgende conclusies getrokken:

- Binnen het bemonsterde bereik op de locatie Botlek resulteert het gebruik van de trilnaald als akoestische bron in de uitbreiding van het golffront door middel van ruimtegolven.
- In de ondiepe ondergrond zal tot een laterale afstand van ca. 200 meter het door de trilnaald gegenereerde signaal waarneembaar zijn boven de ruis voor de gebruikte (of vergelijkbare) geofoons.
- Op de Botlek locatie vindt op drie frequenties resonantie plaats, te weten op ca. 8 (bandbreedte ca. 2 Hz) Hz, op ca. 15 Hz (bandbreedte ca. 10 Hz) en 26 Hz (bandbreedte ca. 2 Hz). Hoewel de frequentie tijdens sonic drilling 200 Hz is en de aanleiding vormde voor dit experiment, bevinden de resonantiefrequenties in de Nederlandse bodem zich voornamelijk tussen de 4 en 30 Hz. Voor de volgende locatie werd daarom de trilnaald aangepast om met frequenties lager dan 200 Hz te kunnen werken.
- De relatieve concentratietoename in de kleinere koolwaterstoffen ($C < 10$) vertoonde een positieve correlatie met afstand van de peilbuis tot de trilnaald. De trillingen veroorzaakten waarschijnlijk deze concentratietoename.
- Het in trilling brengen van de bodem heeft waarschijnlijk geresulteerd in verhoogde BTEX concentraties door gestimuleerde oplossing van oliedruppels. Aanwijzingen voor de mobilisatie van oliedruppels zijn niet gevonden. Een aantal factoren kan daarbij een rol gespeeld hebben:
 - Suboptimale frequentie, waardoor de korrels niet voldoende bewegen. Het verlagen van de frequentie van 200 Hz naar een resonantiewaarde van rond de 50 Hz kan hier mogelijk verbetering in brengen.
 - Als de trillingsfrequentie (en energie) wel voldoende was om oliedruppels los te maken in de waterfase, dan was de grondwaterstroming gegenereerd door de bemonstering waarschijnlijk te klein om deze druppels mee te voeren. Om dezelfde reden, zou er dan ook het best gepompt kunnen worden tijdens de trillingsperiode en niet erna.
 - Als er weinig oliefase in de poriën van de bodem aanwezig is, dan kan er mogelijk een onvoldoende hoeveelheid oliedruppels los getrild worden. Bij een bodem met een hogere NAPL verzadigingsgraad kan eventuele mobilisatie waarschijnlijk makkelijker bewerkstelligd en aangetoond worden. Een hogere porieverzadiging van LNAPL kan mogelijk ook makkelijker leiden tot drijfslagvorming.

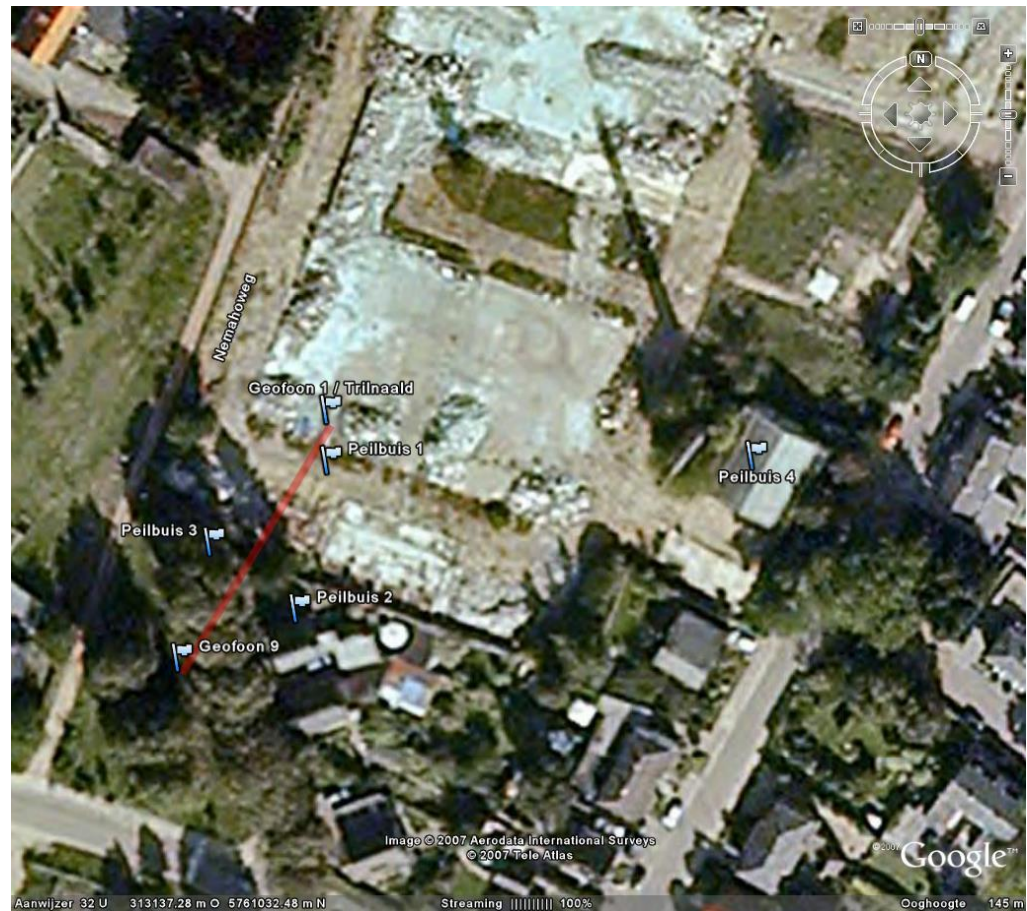
4 Locatie Doetinchem

Akoestische resonantiemetingen zijn verricht op een locatie in Doetinchem met een fijn tot grofzandige bodempakket van meer dan 30 m dik. Na het Botlek experiment is de trilnaald aangepast zodat er met variabele frequenties van 0 tot 200 Hz getrild kan worden.

Ter plaatse van een grond- en grondwaterverontreiniging met VOCl in de zuidwesthoek van het terrein werden peilbuizen 515, 502 en 203 geselecteerd (Figuur 12). Naar deze peilbuizen wordt voor het HIP trilexperiment verwezen als peilbuizen 1, 2 en 3. Als referentie is grondwater ter plaatse van een vierde peilbuis (peilbuis 514; hier peilbuis 4 genoemd) bemonsterd, ten oosten van waar het trilexperiment plaatsvond. Het grondwater in peilbuis 1 is het sterkst vervuild, peilbuizen 2 en 3 liggen stroomafwaarts van peilbuis 1 en zijn minder vervuild (Figuur 12). De trilnaald is 4 meter stroomopwaarts van peilbuis 1 ingebracht. Peilbuizen 2 en 3 liggen op ongeveer 24 en 27 meter afstand van de trilnaald. Deze afstanden vallen ruim binnen de invloedstraal van de trilnaald voor alle gebruikte frequenties (zie Figuur 17).



Figuur 12: De locatie Doetinchem met de concentratiecontouren (grondwater 0-5 m beneden maaiveld) en de geselecteerde peilbuizen en voor het trilexperiment.



Figuur 13: Overzicht van de ligging van de peilbuizen in relatie tot de positie van de trilnaald en de lijn met geofoons waarlangs de trillingen zijn gemeten.

4.1 Methoden

4.1.1 Akoestische condities

Bij de Doetinchem locatie werd, in tegenstelling tot de Botlek locatie, continue getrild (geen rustperiodes) en bij meerdere frequenties (niet alleen bij 200 Hz). Allereerst is de resonantiefrequentie van de bodem bepaald. Het doel van de metingen is om te kijken hoe hard, en in welke frequenties de ondergrond trilt met de trilnaald op de resonantiefrequentie en veelvouden hiervan. Er werd voor alle trilfrequenties gekeken naar:

- 1) de invloedsstraal van het signaal op de onderzoekslocatie;
- 2) de dominante frequenties in de waarnemingen in een zuidwestelijk georiënteerde raai van 9 gefoonlocaties.

4.1.2 Data acquisitie en verwerking

In totaal zijn negen opnames gemaakt met het seismische opnamesysteem Summit van TNO. Tijdens de eerste twee opnames stond de trilnaald niet aan, hierna stond deze wel steeds in een andere frequentie aan. Details zijn weergegeven in Tabel 1.

Tabel 1 Opnameparameters Doetinchem. Alle opnames zijn met 4 ms opname interval en 22528 samples uitgevoerd. Totale opname tijd per opname is 90.112 seconden.

<i>Tijd</i>	<i>Frequentie trilnaald (Hz)</i>	<i>Rec#</i>	<i>Opmerking</i>
11:30 – 11:32	-	1	Achtergrondwaarde
11:45 – 11:47	-	2	Achtergrondwaarde
11:59 – 12:01	12	3	
12:34 – 12:36	24	4	
12:40 – 12:42	48	5	
12:44 – 12:46	96	6	Naald ging om 13:05 spontaan dieper
13:10 – 13:12	96	7	
13:16 – 13:18	132	8	
13:21 – 13:23	192	9	

De locaties van de gefoons en peilbuizen zijn weergegeven in Figuur 13. De onderlinge afstand tussen de gefoons was 6 m. De eerste gefoon stond op dezelfde locatie als de trilnaald. De positie van de gefoons is ook weergegeven in Tabel 2.

Tabel 2 Posities van de gefoons en peilbuizen ten opzichte van de trilnaald

<i>Omschrijving</i>	<i>Afstand vanaf trilnaald</i>
Gefoon 1	0 m
Gefoon 9	47.5 m
Peilbuis 1	8 m
Peilbuis 2	24 m
Peilbuis 3	28 m
Peilbuis 4	Referentie (buiten bereik trilnaald)

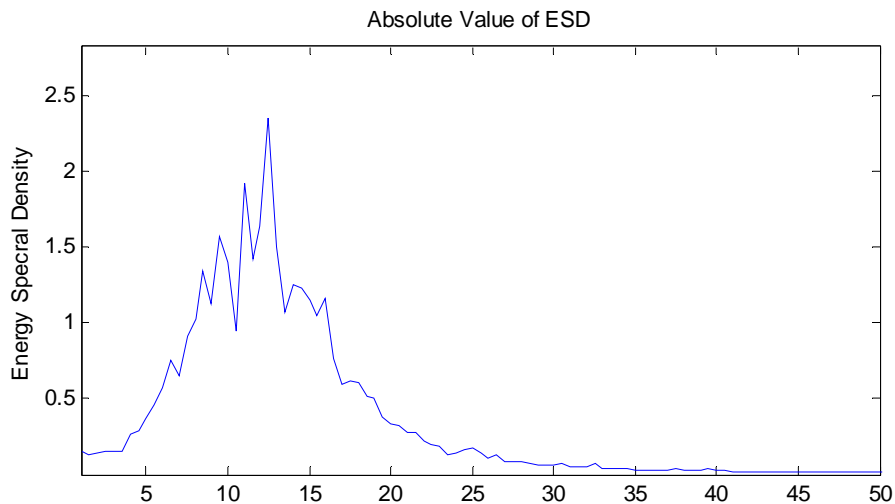
4.1.3 *Bemonstering grondwater*

De eerste ronde vond plaats voordat er met trillen begonnen werd. Bemonstering vond plaats gedurende dag tijdens de geselecteerde trilfrequenties: 0 Hz (achtergrond), 12 Hz (resonantiefrequentie bodem, Figuur 14), 96 Hz, 192 Hz (als referentie voor Botlek experiment en “sonic drilling”, Figuur 18 tot Figuur 20). Om een representatief grondwatermonster te kunnen nemen werd tijdens elke peilbuisbemonstering eerst het volume van de peilbuis doorgespoeld (20-30 L).

4.2 **Resultaten Doetinchem**

4.2.1 *Akoestiek*

Als eerste is op deze locatie de resonantiefrequentie bepaald. Deze bedraagt 12 Hz (zie Figuur 14).

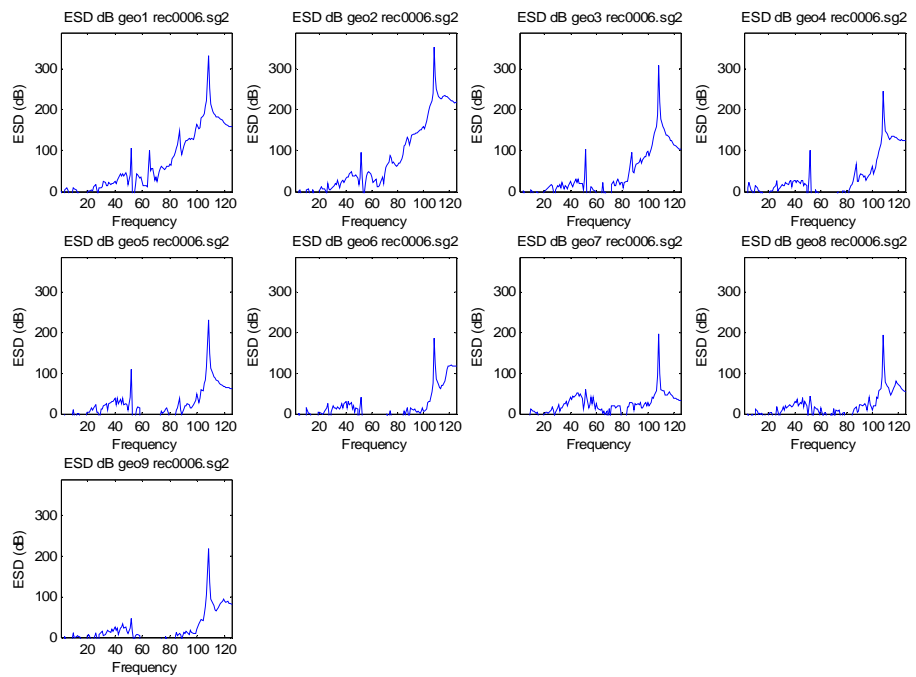


Figuur 14 Resonantiefrequentie van metingen tijdens relatieve stilte (ambient noise) op de onderzoekslocatie, waaruit blijkt dat de resonantiefrequentie van de ondergrond op de onderzoekslocatie tussen 11 en 13 Hz ligt.

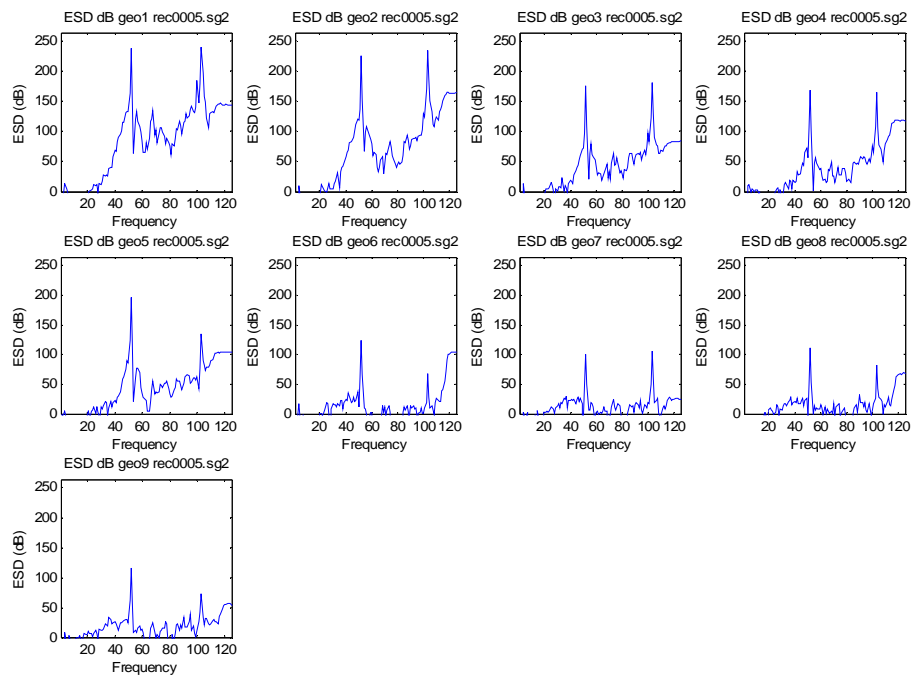
De getransformeerde data (getransformeerd volgens Bijlage A) zijn weergegeven in Figuur 15 (48 Hz) en Figuur 16 (96 Hz). Data zijn hier weergegeven in dB ten opzichte van de achtergrondwaarde. De figuren geven weer welke trilling het sterkste doorkomt. Tevens is de totale signaalgrootte per geofoon weergegeven in Figuur 17. Dit is op twee manieren gedaan: links in de figuur voor de maximale waarden van de ESD plot (bijvoorbeeld de pieken op ca 50 en 100 Hz) en rechts in de figuur voor de integraal van de ESD plot.

Uit Figuur 17 blijkt dat de hoogste amplitudes voor gemeten trillingen worden gevonden voor 48 en 96 Hz. Ook bij de verst gelegen geofoon zit de amplitude nog ongeveer 10 – 20 dB boven de achtergrondwaarden, de ‘ambient noise’. Dit geeft aan dat de trilnaald niet optimaal functioneert op frequenties die lager liggen dan ca. 40 Hz. Dit is een fysieke eigenschap van de trilnaald en staat vrijwel los van ondergrondeigenschappen.

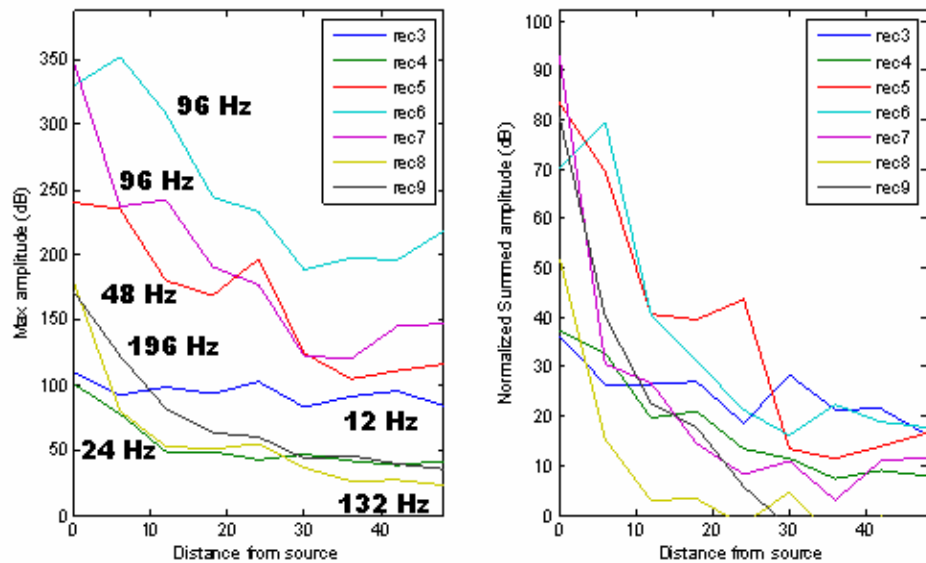
Verder valt op in de maximale en gesommeerde waarden in Figuur 17, dat als de trilnaald op de resonantiefrequentie van 12 Hz trilt, de amplitude van dit signaal in de ondergrond weliswaar niet zo groot is als op andere waarden, maar nauwelijks afneemt bij een toename van de afstand tot de trilnaald en op 48 m nog net zo sterk is als de gesommeerde waarden van 48 en 96 Hz. Dit gedrag is representatief voor resonantie en gaat in mindere mate ook op voor het meervoud van de trilfrequentie bij 24 Hz. Omdat de signalen al zijn gecorrigeerd voor mogelijke verschillen in de prestatie en koppeling van de geofoons, kon worden gesteld dat de afwijkingen ten opzichte van een gladde afname curve in Figuur 17 worden veroorzaakt door de verschillen in ondergrond.



Figuur 15 Spectrale amplitudes per geofoons voor opname 6, waar de trilnaald met ca. 96 Hz trilt.



Figuur 16 Spectrale amplitudes per geofoons voor opname 5, waar de trilnaald met ca. 48 Hz trilt.



Figuur 17 Amplitudes van de verschillende opnames, gerefereerd aan de achtergrondwaarden. Links de gemeten maximale amplitude in het signaal. Rechts het gewogen totale trillingsignaal ten opzichte van de achtergrond.

Er valt op dat tijdens opnames 8 en 9, waarbij de trilnaald op respectievelijk 132 en 196 Hz stond er weliswaar veel energie heerst nabij de gefoons, maar dat dit hogefrequentere signaal ook sneller uitdooft en al op ca. 30 m op de gesommeerde waarde van de achtergrondwaarde zit.

De waargenomen effecten die zijn weergegeven in Figuur 17, kunnen worden geïnterpreteerd door de volgende combinatie van effecten:

- De trilnaald brengt zijn trilling het makkelijkst over vanaf ongeveer 48 Hz tot ongeveer 200 Hz. Dit is een eigenschap van de trilnaald en heeft weinig met de eigenschappen van de ondergrond te maken;
- De grond trilt het makkelijkst mee in zijn resonantiefrequentie (f_R). Het signaal van de trilnaald wordt ook nauwelijks gedempt over de gehele afstand gefoons. Helaas trilt de trilnaald dan niet optimaal;
- De meervouden van de resonantiefrequentie die vallen op de frequenties $2^{N*} f_R$ ($N=1,2,3,\dots$), zorgen voor veel trillingen in de ondergrond;
- Hogere frequenties (in ieder geval > 132 Hz) zijn niet meer waarneembaar voor alle gefoons en dempen sneller uit dan de laagfrequente metingen.

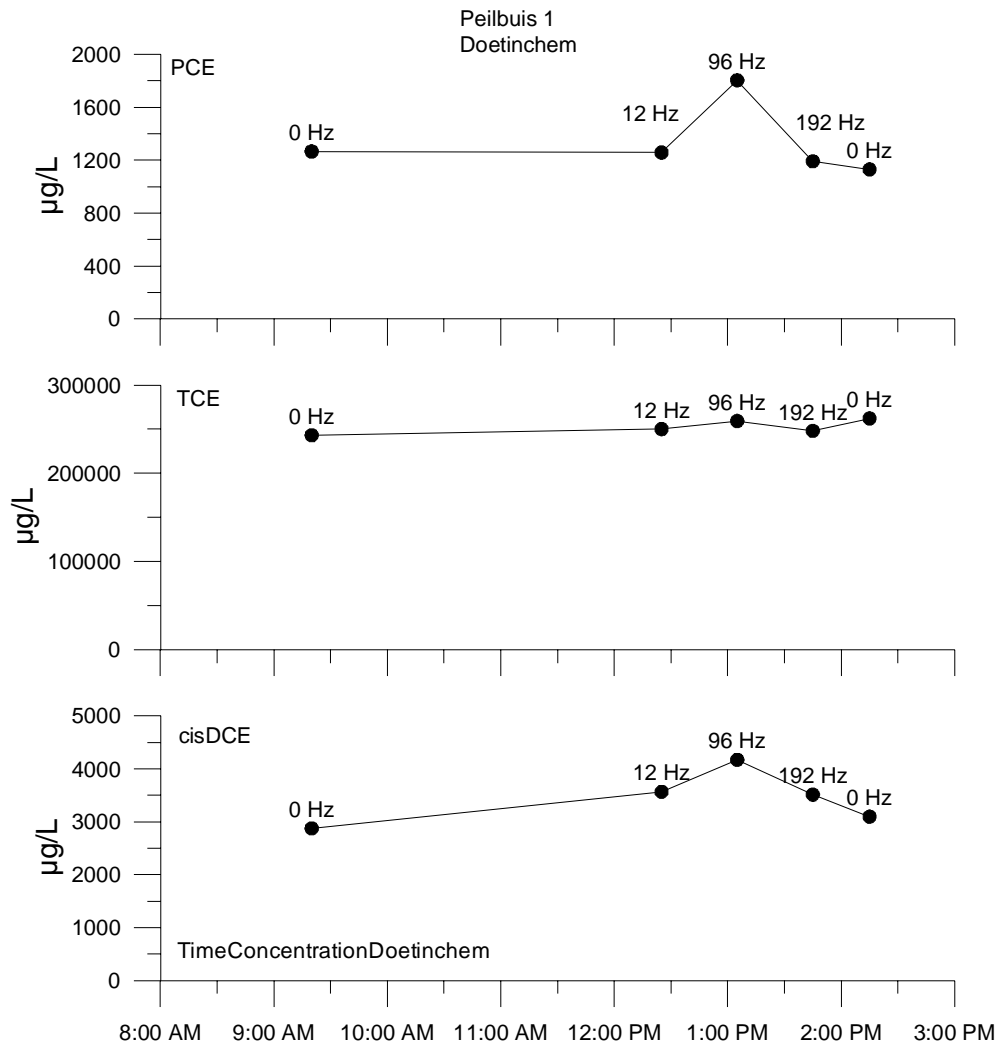
4.2.2 Concentraties in grondwater

Tri was de VOCl met de hoogste concentratie in alle analyses (Tabel 3). Daarnaast werden cis-DCE en Per verhoogd aangetroffen. 1,1,1-TCA werd alleen aangetroffen in peilbuis 1. 1,1-DCA en 1,2-DCA werden in geen van de geanalyseerde monsters aangetroffen. In peilbuis 4 (referentie) werden geen VOCl's aangetroffen. In vergelijking met de resultaten in het Botlek experiment (Figuur 10 en Figuur 11) vond er geen grote variatie ($<20\%$) in concentraties plaats.

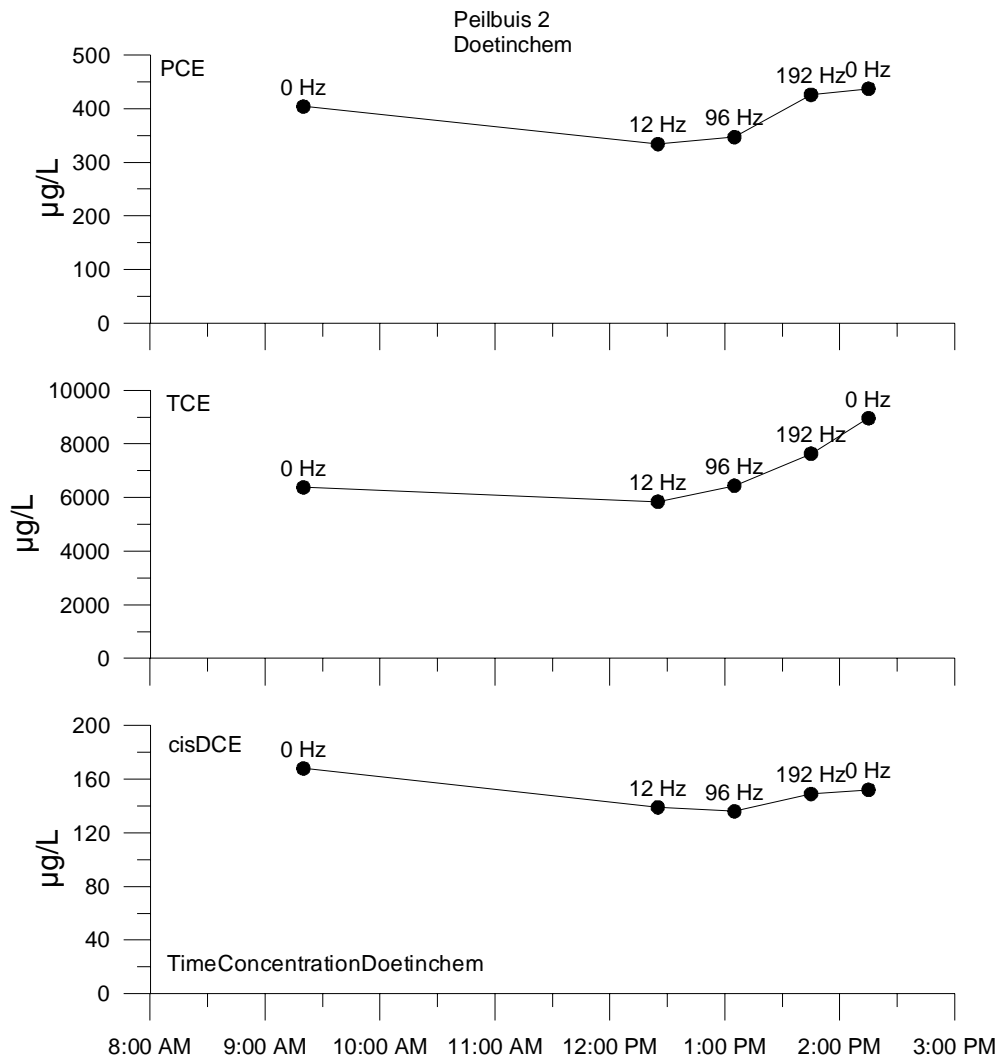
Tabel 3 VOCl-concentraties tijdens trillexperiment op de locatie Doetinchem

<i>PB</i>	<i>Time</i>	<i>Hz</i>	<i>Tri</i>	<i>cis-DCE</i>	<i>Per</i>	<i>1,1,1-TCA</i>
			$\mu\text{g/l}$	$\mu\text{g/l}$	$\mu\text{g/l}$	$\mu\text{g/l}$
1	9:20 AM	0	243.147	2.875	1.266	38
1	12:25 PM	12	250.124	3.564	1.258	34
1	1:05 PM	96	259.195	4.169	1.804	47
1	1:45 PM	192	248.129	3.512	1.192	34
1	2:15 PM	0	262.243	3.095	1.130	30
2	9:20 AM	0	6.380	168	404	<<
2	12:25 PM	12	5.845	139	334	<<
2	1:05 PM	96	6.440	136	347	<<
2	1:45 PM	192	7.635	149	426	<<
2	2:15 PM	0	8.960	152	437	<<
3	9:20 AM	0	620	9	52	<<
3	12:25 PM	12	604	9	48	<<
3	1:05 PM	96	631	10	46	<<
3	1:45 PM	192	543	8	38	<<
3	2:15 PM	0	705	10	59	<<
4	9:20 AM	0	<<	<<	<<	<<
4	12:25 PM	12	<<	<<	<<	<<
4	1:05 PM	96	<<	<<	<<	<<
4	1:45 PM	192	<<	<<	<<	<<
4	2:15 PM	0	<<	<<	<<	<<

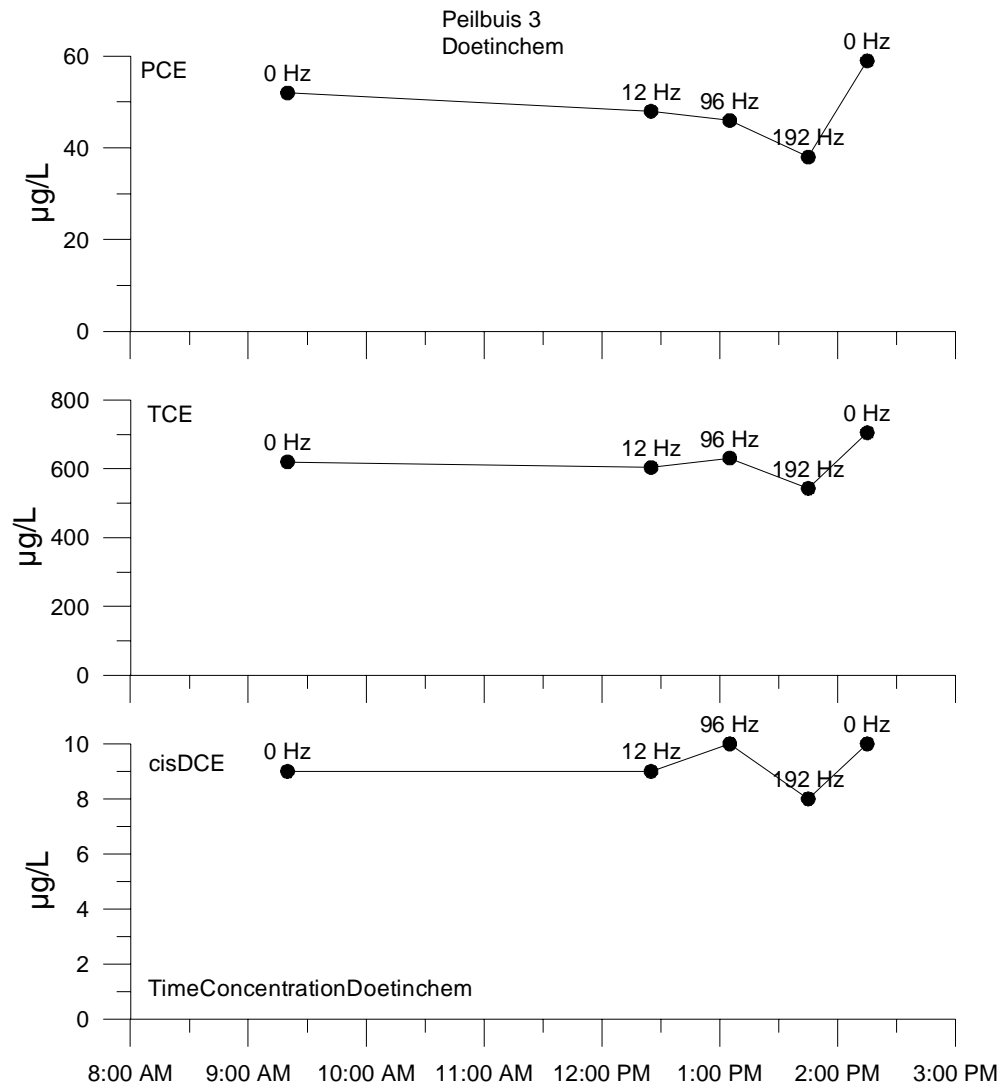
In Figuur 18 tot Figuur 20 worden de gemeten concentraties voor respectievelijk peilbuis 1, 2 en 3 gepresenteerd. In peilbuis 1 zijn de concentraties aan VOCl's het hoogst (Figuur 18). Bij de trilfrequentie van 96 Hz wordt in deze peilbuis de hoogste concentratie aan Per en cis-DCE aangetroffen. Dit is ook de trilfrequentie die het sterkst doorkwam in de geofonmetingen (Figuur 17). De concentraties tijdens de andere frequenties geven geen duidelijke afwijking van de achtergrondsituatie (0 Hz). In peilbuis 2 werd een stijgende trend in concentraties geobserveerd. Echter, de concentraties in peilbuizen 2 en 3 laten geen duidelijk maximum zien tijdens een bepaalde frequentie (Figuur 19 en Figuur 20).



Figuur 18: Per, Tri en cis-DCE concentraties gedurende de dag voor peilbuis 1. De labels geven aan bij welke trilfrequentie de trilnaald actief was op het tijdstip van bemonstering.



Figuur 19: Per, Tri en cis-DCE concentraties gedurende de dag voor peilbuis 2. De labels geven aan bij welke trilfrequentie de trilnaald actief was op het tijdstip van bemonstering.



Figuur 20: Per, Tri en cis-DCE concentraties gedurende de dag voor peilbuis 3. De labels geven aan bij welke trilfrequentie de trilnaald actief was op het tijdstip van bemonstering.

4.3 Discussie en conclusies Doetinchem

Alle peilbuizen, behalve referentiepeilbuis 4, vielen binnen het bereik van de trilnaald. Aangezien in peilbuis 1 de concentratie Tri meer dan 15% van oplosbaarheid is, wijst dit op de nabijheid van pure fase (DNAPL). Het is dus aannemelijk dat door middel van de concentratiemetingen in peilbuis 1 de effecten van de akoestische trillingen op het oplossen of mobiliseren DNAPL bepaald zou kunnen worden. Doordat de VOCl-concentraties in peilbuis 4 beneden de detectielimiet lagen, kon de mate van variatie in concentratie met de tijd buiten de invloed van de ingebrachte trillingen niet bepaald worden. Peilbuizen 2 en 3 bevinden zich weliswaar binnen het bereik van de trilnaald, maar de geobserveerde concentraties zijn te laag om op de nabijheid van DNAPL te wijzen. De waargenomen variatie in concentratie is waarschijnlijk het gevolg van variatie in de pluim en/of door variatie in grondwaterstromingsrichting. Dichter bij de DNAPL bron is minder variatie in concentraties te verwachten. De relatieve concentratieverschillen gemeten in de tijd voor peilbuis 1 zijn echter vergelijkbaar met

die in peilbuis 2 en 3. Aangezien de verhoogde concentraties in peilbuis 1 alleen optreden tijdens het trillen bij 96 Hz, suggereert dit dat deze verhoging het gevolg is van verstoring van de DNAPL door de ingebrachte trillingen.

Als we aannemen dat de verhoogde concentratie in peilbuis 1 het gevolg is van trillingen bij 96 Hz, dan zijn hiervoor drie scenario's te beschouwen die voor verhoogde concentraties in de peilbuis hebben kunnen zorgen:

1. De trillingen resulteerden in verstoring van een DNAPL laag en de mobilisatie van DNAPL druppeltjes die na transport met grondwater bemonsterd werden;
2. De trillingen resulteerden in verstoring van een DNAPL laag en de mobilisatie van DNAPL druppeltjes die tijdens het transport met het grondwater oplossen voordat ze bemonsterd werden;
3. De trillingen resulteerden in verstoring van een DNAPL. Het vergrootte DNAPL-grondwater contactoppervlak dat dit gevolg had leidde tot versterkte oplossing.

De aangetroffen concentraties van de VOCs en hun oplosbaarheden kunnen gebruikt worden voor het beoordelen van het meest waarschijnlijke scenario. Dit komt omdat de oplosbaarheid van VOCs in water afhangt van hun oplosbaarheidsproduct en de aanwezige molaire verhouding in de DNAPL (Wet van Raoult).

Door de eerder gebleken afwezigheid van natuurlijke afbraak op deze locatie, is de aanname dat cis-DCE een component in de DNAPL is. Dit is niet onwaarschijnlijk aangezien cis-DCE zowel als component in Tri en Per voorkomt als zelf als oplosmiddel gebruikt kan zijn. De VOC componenten cis-DCE, Per en TCA (Tabel 3) komen slechts in zeer kleine hoeveelheden (> 2 orden van grootte lager) voor in het grondwater ten opzichte van Tri. Op basis van deze concentraties is het aandeel Tri in de DNAPL meer dan 95%. Daarom zouden we bij scenario 1 een overschrijding van het absolute oplosbaarheidsproduct (1100 mg/L) van Tri verwachten. Dit is niet het geval (Figuur 18). De concentraties van Tri in peilbuis 1 zijn 22-23% van het oplosbaarheidsproduct.

Als de gemobiliseerde DNAPL druppeltjes volledig oplossen in het grondwater voordat ze bij de peilbuis aankomen (scenario 2) zouden we verwachten dat de concentraties in het grondwater de samenstelling van de DNAPL zouden weergeven. Aangezien de oplosbaarheid in water van cis-DCE (5700 mg/L) hoger en de oplosbaarheid van Per (200 mg/L) lager is dan van Tri, is de samenstelling van de DNAPL fase waarschijnlijk relatief armer aan cis-DCE en rijker aan Per. Dit zou betekenen dat de verhouding tussen cis-DCE en Tri omlaag en die tussen Per en Tri omhoog zou moeten gaan. Dit is echter niet het geval, beide verhouding gaan omhoog (Figuur 18).

Dit suggereert dat scenario 3, het optreden van gestimuleerde oplossing van de DNAPL door trillingen, het meest voor de hand liggend is. Bij een nadere beschouwing van scenario 3, is de verwachting dat alle concentraties ongeveer verhoudingsgewijs gelijk omhoog gaan bij verbeterde oplossing van de DNAPL. Dit is niet het geval. De concentratie van Tri gaat relatief niet evenveel omhoog als die van cis-DCE en Per. De totale stijging in VOC concentraties is 4%. Tri stijgt slechts met 3% terwijl cis-DCE en Per met 130% en 145% stijgen. Dit verschil in relatieve stijging kan samenhangen met het opbreken van DNAPL (scenario 3). Aangezien cis-DCE en Per slechts in kleine verhouding ten opzichte van Tri (>95%) in de DNAPL aanwezig zijn, kunnen er verschillen in concentraties binnen de DNAPL optreden, bijvoorbeeld door

diffusiegradiënten richting DNAPL-grondwater grensvlak. Hierdoor kan een relatieve concentratieverhoging van de als sporen in de DNAPL aanwezige componenten worden verklaard bij opbreken van DNAPL.

Voor wat betreft de effecten van akoestische trillingen op bodem en DNAPL op de Doetinchem locatie worden de volgende conclusies getrokken:

1. De verhoogde VOCl concentraties in peilbuis 1 werden waarschijnlijk veroorzaakt door trillingen bij een frequentie van 96 Hz. Deze wijzen op het gestimuleerd oplossen van DNAPL en niet op het mobiliseren van DNAPL fase.
2. Peilbuizen 2 en 3 liggen weliswaar binnen de invloedstraal van de trillingen, maar de afwezigheid van nabije DNAPL fase voorkwam verhoogde VOCl concentraties in het grondwater.
3. De bodem trilde het hardst mee op frequenties van 48 en 96 Hz. Deze frequenties waren tot op een afstand van 40 onderscheidbaar van de achtergrond.
4. De trilling bij 196 Hz (vergelijkbaar met “*sonic drilling*”) had een kleine invloedstraal, tot maximaal 25 meter.
5. De demping van het signaal was het kleinst op de resonantiefrequentie (12 Hz).

5 Algemene Discussie en Conclusies

De resultaten op zowel de Botlek locatie als de Doetinchem locatie geven aan dat er geen NAPL fase gemobiliseerd is. Wel is het waarschijnlijk dat op beide locaties het oplossen van NAPL gestimuleerd is. Op basis van de nieuwe inzichten uit de resultaten van het trillexperiment bij Doetinchem is de verwachting dat de optimale trilfrequentie voor gestimuleerd oplossen niet bij 200 Hz ligt maar waarschijnlijk lager. De reden hiervoor is dat op de meeste locaties in Nederland de resonantiefrequentie, waarbij trillingen zich het beste voortplanten in de bodem, zich voornamelijk bevindt tussen 2 en 30 Hz (Bijlage B). Slappe grond (veen, slappe klei) heeft een lagere resonantiefrequentie (2-10 Hz) dan grond waarin zich veel zand bevindt (10-30 Hz). Hoge resonantiefrequenties (tot 60 Hz) worden slechts enkele malen gemeten.

Wat betreft het onderliggende mechanisme van mobilisatie lijkt het onwaarschijnlijk dat trilling van de NAPL druppeltjes zelf de eventuele mobilisatie veroorzaakt. Naarmate een object kleiner wordt gaat de resonantiefrequentie omhoog. Tegelijkertijd gaat de invloedstraal van de trilling in de bodem omlaag. Dat principe wordt geïllustreerd in Figuur 17. Aangezien de verwachte resonantiefrequentie voor een NAPL druppeltje op korrelschaal duizenden malen kleiner is dan voor de grond als geheel, is de invloedstraal naar verwachting nihil (mm). Een versturende werking op NAPL fasen door akoestische trillingen komt dus waarschijnlijk voort uit resonantie van de bodem als geheel. Zoals getoond in dit onderzoek heeft de frequentie waarbij dit gebeurt ook een veel grotere invloedstraal.

Op de locatie Doetinchem werd waarschijnlijk licht versterkte oplossing (+3%) van NAPL fase geobserveerd. Deze vrachtverwijdering is klein in vergelijking tot de potentie van het mobiliseren van NAPL fasen waar naar gezocht werd in de hypothese van deze HIP-pilot. In het licht van de mogelijkheden om locaties met NAPL verontreinigingen door middel van akoestische trillingen versneld te kunnen saneren, is het verhogen van de oplossnelheid dus weinig effectief. Om werkelijk verhoogde vrachtverwijdering mogelijk te maken moet er naast de generatie en mobilisatie van kleine NAPL druppeltjes ook een voldoende grote grondwaterstroming zijn om ze mee te voeren.

De mate waarin akoestische trillingen een verstrend effect op een NAPL kunnen hebben hangt, naast de trillingsfrequentie, ook af van de energie waarmee deze de NAPL bereiken. Daarmee is ook de positie van de trillingsbron ten opzichte van de ruimtelijke verdeling van NAPL fasen in de bodem van belang. De frequentie die tijdens *sonic drilling* (200 Hz) gebruikt wordt is weliswaar niet optimaal, maar gezien het hoge energieniveau waarmee dit gepaard gaat, zal NAPL in de nabijheid van de boorlocatie waarschijnlijk toch beïnvloed worden. Dit verklaart waarschijnlijk de praktijkobservaties die aanleiding gaven tot dit onderzoek. De ruimtelijke verdeling van NAPL fasen, met name die van DNAPLs, is in de praktijk veelal de grootste onbekende. Verbeterd inzicht in die verdeling op locaties kan dus helpen bij de beschouwing of de (geplande) *sonic drilling* mogelijk tot verstoring van de NAPL fasen kan leiden. Het effect van deze verstoring hangt naar verwachting ook af van de verzadigingsgraad waarmee de NAPL in de bodemporiën aanwezig is. Voor DNAPL fasen met hoge porie verzadigingsgraden, zoals van met name zaklagen, moet rekening gehouden worden met mogelijk negatieve effecten als het verder wegzaken van de NAPL fase.

Voor residuaire porieverzadigingen is het waarschijnlijk dat de verstoring hooguit tot het beter toegankelijk maken van de NAPL fasen leidt. Dit kan de oplossing versnellen. Op basis van de resultaten uit deze studie is dat effect gering, en is het niet kosteneffectief om alleen met dat doel de trillingen in de bodem te brengen. Mogelijk kan echter een verbeterde toegankelijkheid de werking van ingebrachte remediatiemiddelen verbeteren. Om hier uitsluitsel over te geven zou de werking en kosteneffectiviteit hiervan verder onderzocht moeten worden.

Om van deze mogelijk positieve effecten te profiteren kan men, waar mogelijk, het uitvoeren van *sonic drilling* laten samenvallen met de actieve saneringmaatregelen (bv. NAPL extractie of ISCO). Ten behoeve van een verbeterd begrip over de condities waaronder trillingen wel mobilisatie van NAPL fasen veroorzaakt zouden de saneringscondities (bv. de hoeveelheid vrachtverwijdering) voor en tijdens actieve *sonic drilling* kunnen worden vergeleken.

6 Referenties

- Chrysikopoulos, C.V. and Vogler, E.T., 2004. Acoustically Enhanced Multicomponent NAPL Ganglia Dissolution in Water Saturated Packed Columns. *Environ. Sci. Technol.*, 38(10): 2940-2945.
- Kim, Y.U. and Wang, M.C., 2003. Effect of ultrasound on oil removal from soils. *Ultrasonics*, 41(7): 539-542(4).
- Kostrov, S. and Wooden, W., 2005. In situ seismic stimulation shows promise for revitalizing mature fields. *Oil & Gas Journal*, 103(15): 43-49.
- Vogler, E.T. and Chrysikopoulos, C.V., 2004. An experimental study of acoustically enhanced NAPL dissolution in porous media. *Aiche Journal*, 50(12): 3271-3280.

A Resonantieplots

A.1 Berekening 'Energy Spectral Density (ESD)'

De ESD wordt als volgt berekend:

$$\Phi(\omega) = \left| \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \right|^2 = \frac{F(\omega) F^*(\omega)}{2\pi}$$

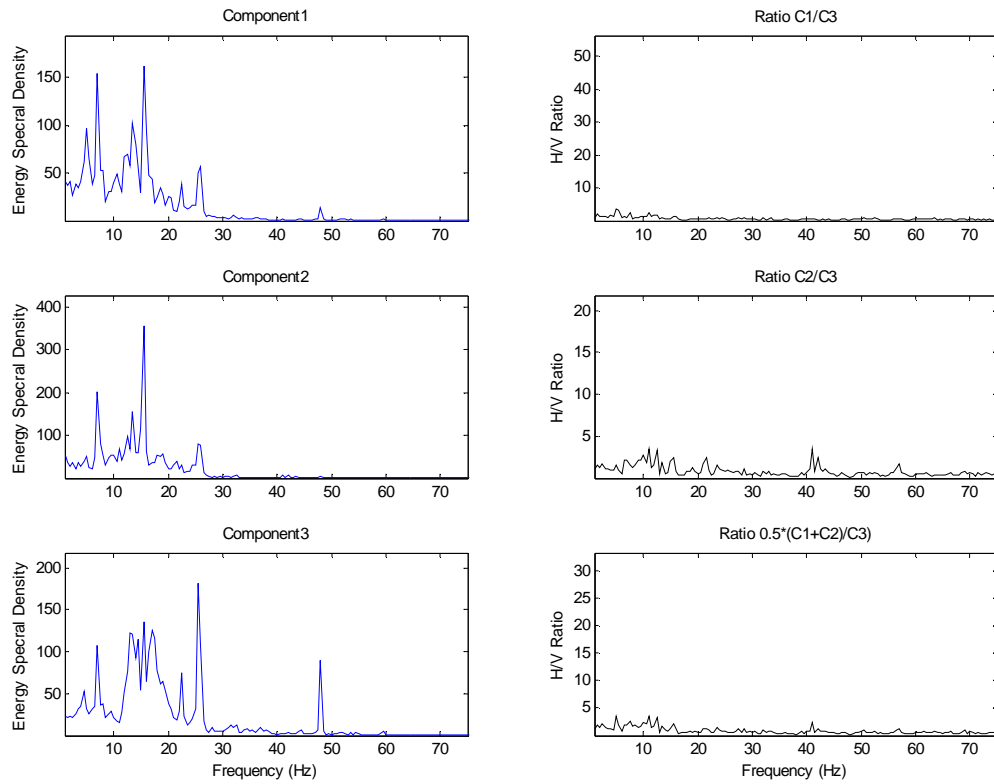
Waar F de signaalsterkte per gefoon component, en F* de complex geconjugeerde. Na het toepassen van een mediaan filter, wordt de absolute waarde berekend:

Error! Objects cannot be created from editing field codes.

waarin **Error! Objects cannot be created from editing field codes.** de absolute 3-d waarde is, **Error! Objects cannot be created from editing field codes.** en **Error! Objects cannot be created from editing field codes.** de loodrecht op elkaar staande horizontale component van de gefoon zijn en **Error! Objects cannot be created from editing field codes.** de verticale component.

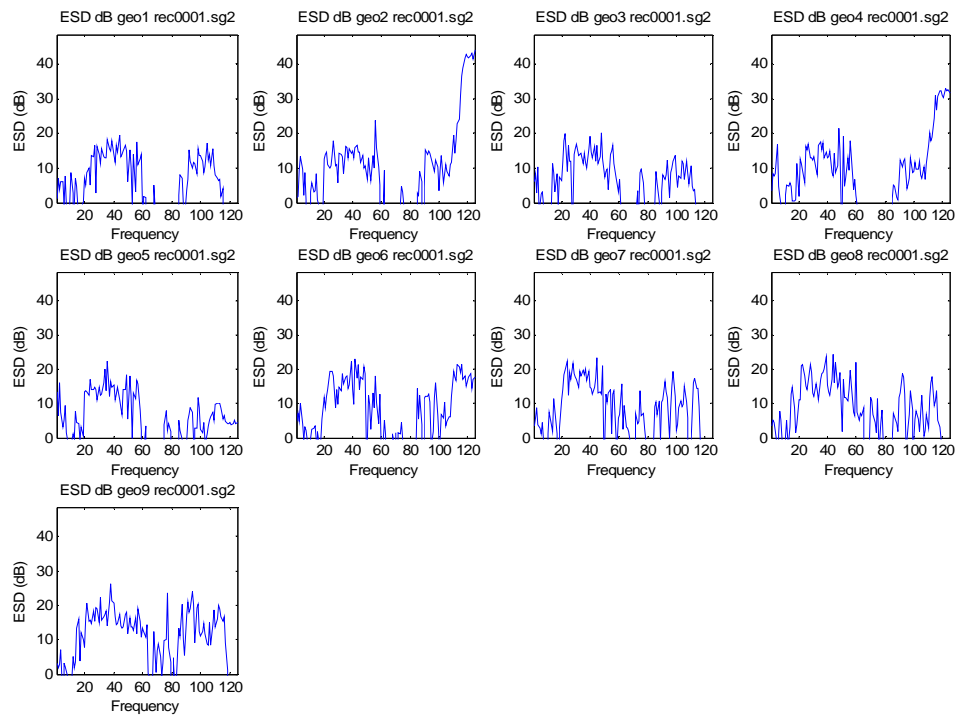
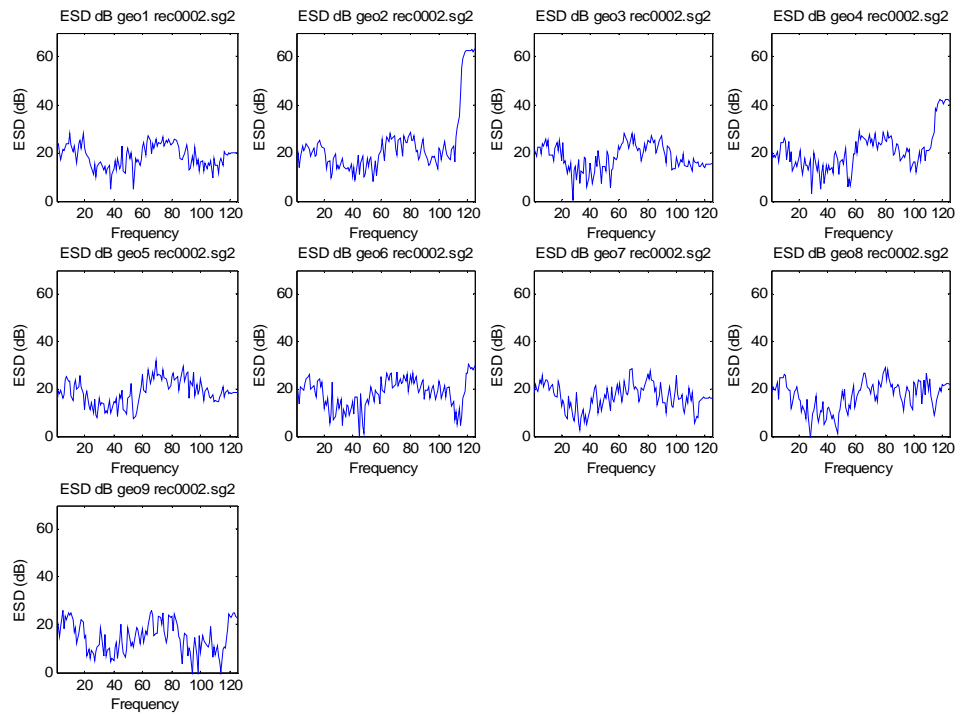
A.2 Botlek locatie

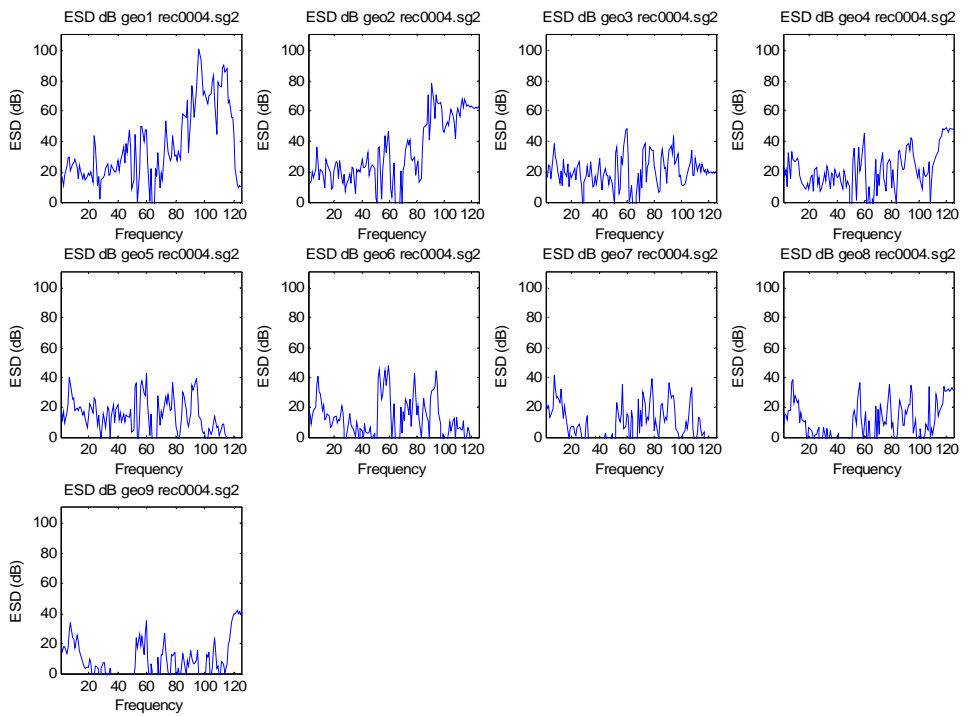
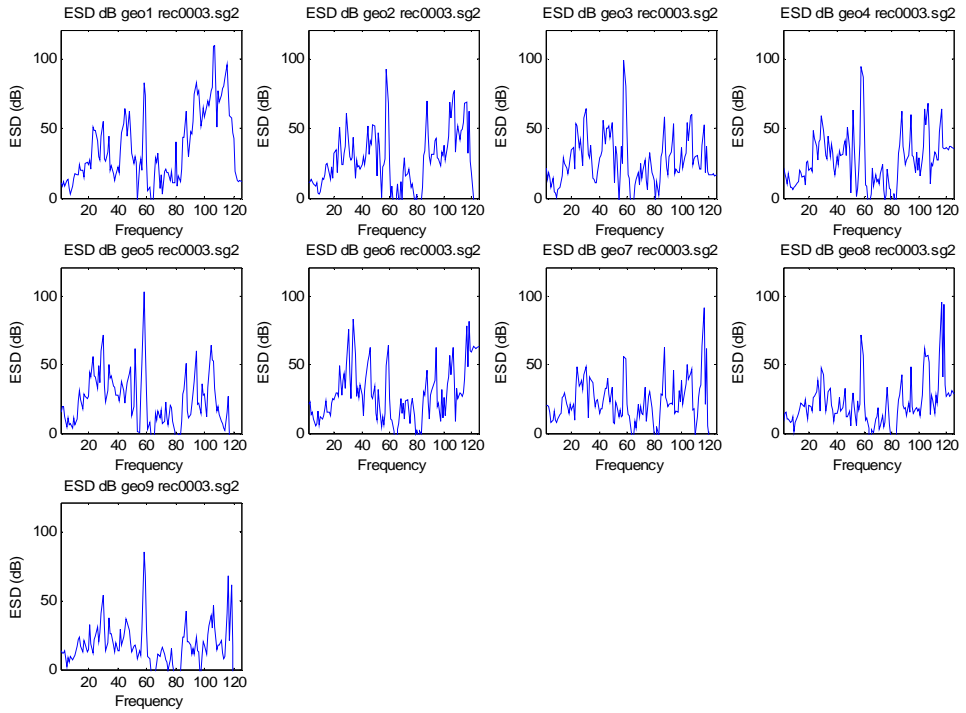
In totaal is 120 seconden aan 'ambient' signaal opgenomen, afkomstig van 5 gefoons die twee maal 12 seconden achter elkaar hebben gemeten. De trilnaald stond hierbij uit en er werd dus slechts omgevingsruis (ook wel ambient noise genoemd) gemeten. De 5 gefoons hebben in x-, y- en z-richting gemeten, waarbij x de oost-west-, y de noord-zuid- en z de verticale richting is. Er van uitgaande dat de gelaagdheid op de gemeten locaties geen noemenswaardige verschillen kent, zijn de signalen in het tijddomein bij elkaar opgeteld om zodoende 120 seconden opnametijd van drie componenten te verkrijgen. Op dezelfde manier als uitgelegd in Bijlage A.1, zijn de resonantiefrequenties voor de meetlocatie berekend en weergegeven in onderstaand figuur. Op drie frequenties vindt resonantie plaats, te weten op ca. 8 (bandbreedte ca. 2 Hz) Hz, op ca. 15 Hz (bandbreedte ca. 5 Hz) en 26 Hz (bandbreedte ca. 2 Hz). Het medium vertoont geen opvallende verschillen tussen horizontale en verticale bodembeweging.

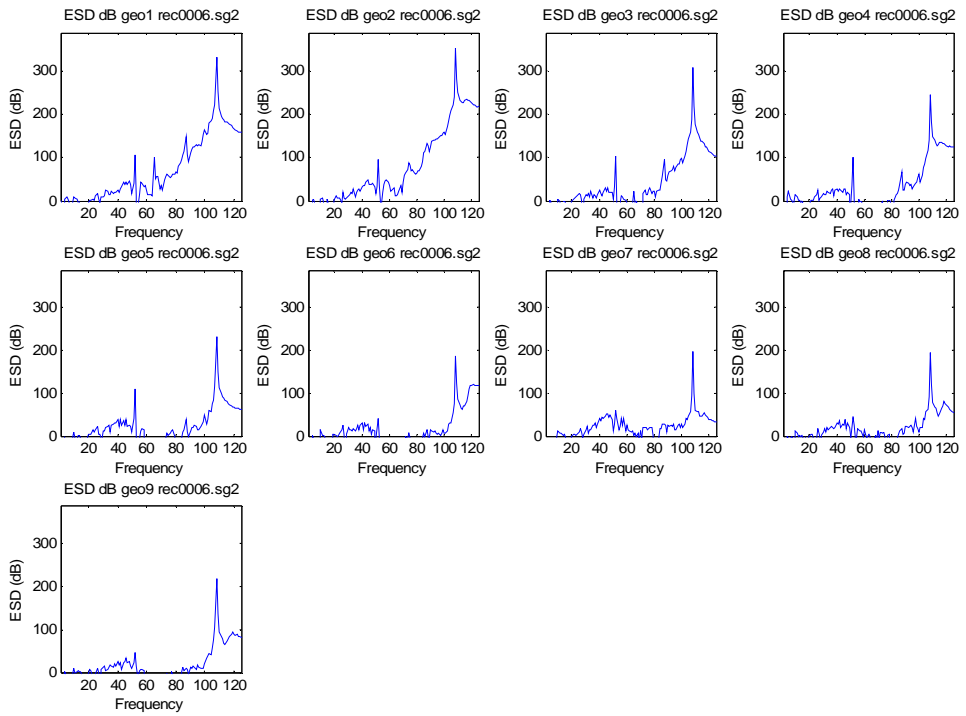
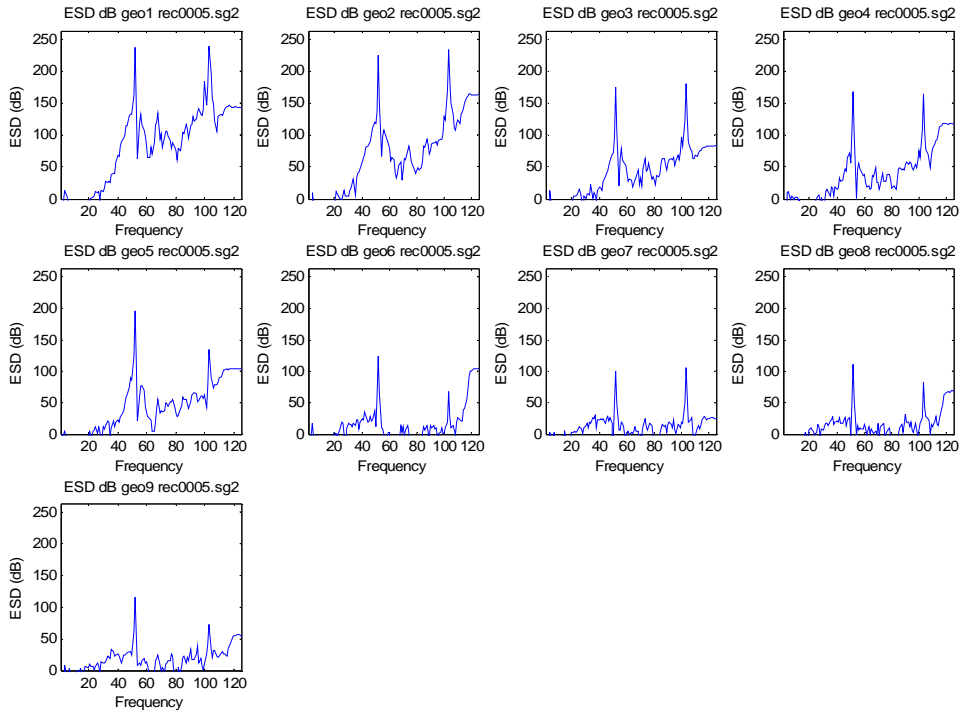


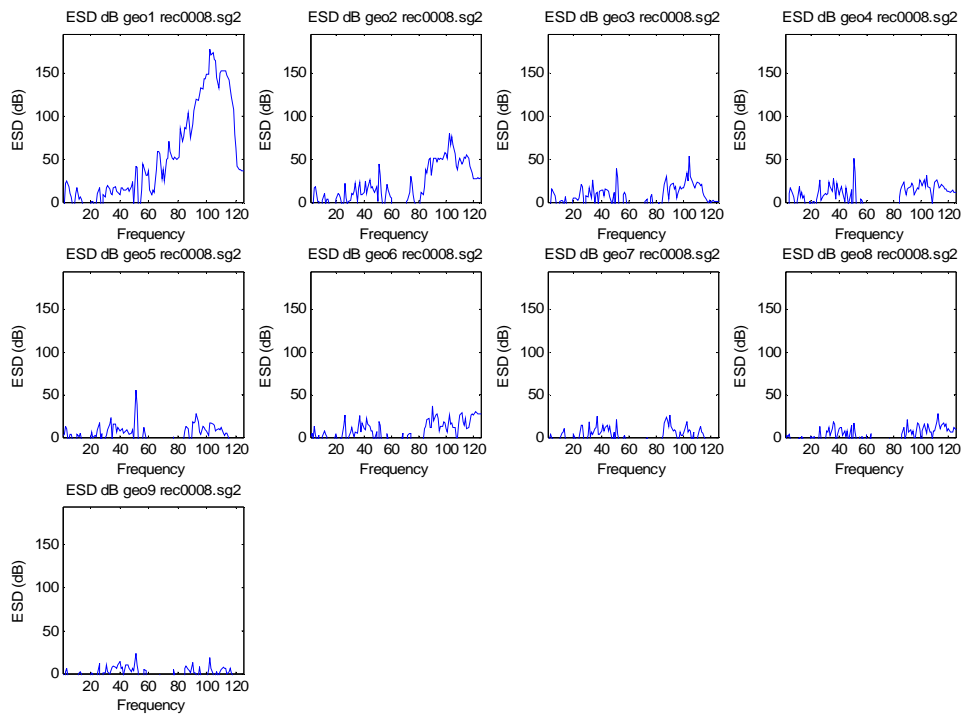
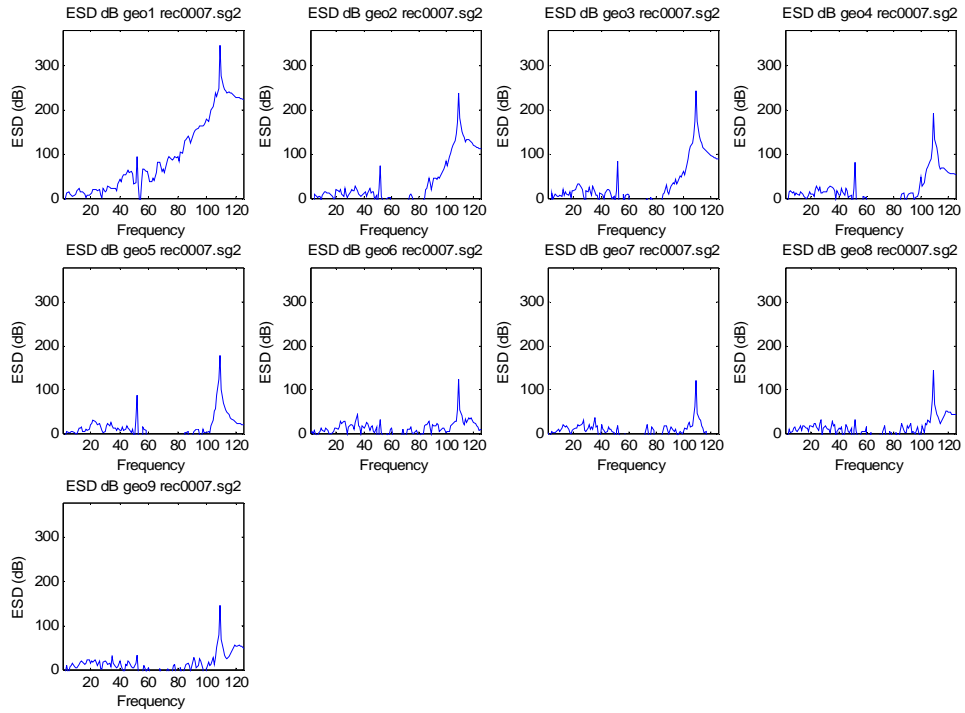
Figuur 21 Resonantiefrequenties op de Botlek locatie. De grafieken in de linkerkolom tonen resonantie in oost-west richting (linksboven), noord-zuid-richting (linksmidden) en verticale richting (linksonder). De grafieken in de rechterkolom geven aan dat er weinig verschil is in horizontale en verticale bodembeweging.

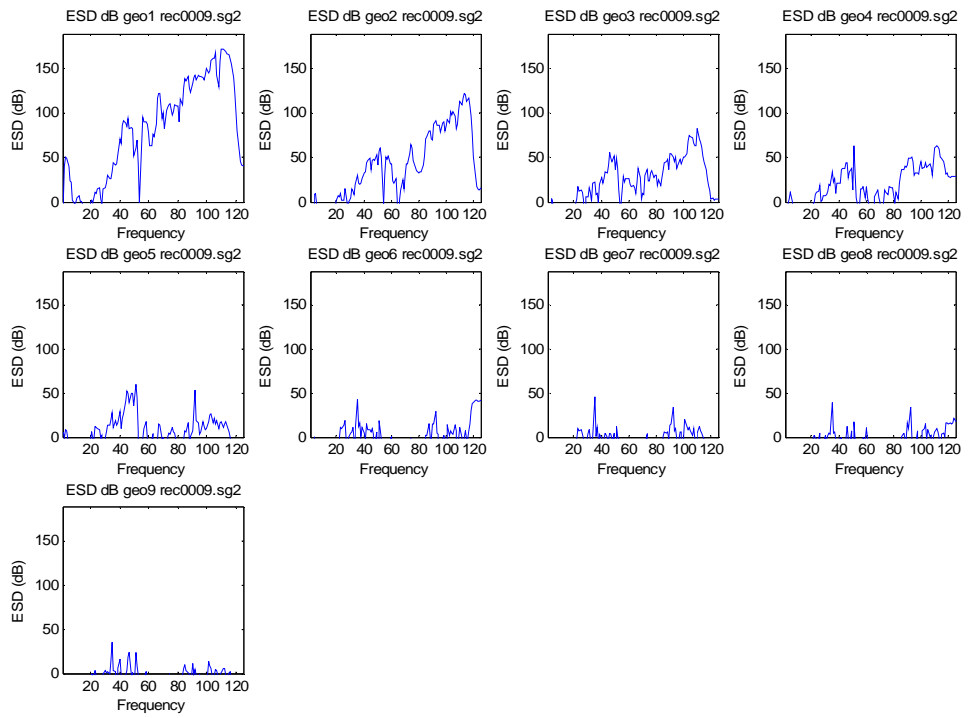
A.3 Doetinchem locatie











B Resonantiefrequenties in Nederland

Samenvatting

Resonantiefrequenties van de Nederlandse bodem bevinden zich voornamelijk in de frequenties tussen 4 en 30 Hz. Dit is een ruwe eerste schatting uit slechts 11 metingen verdeeld over Nederland. Bandbreedte (afstand tussen de -3 dB punten) van de resonantiefrequenties is vaak groter dan 5 Hz. Slappe grond (veen, slappe klei) heeft een lagere resonantiefrequentie (4-10 Hz) dan grond waar zich veel zand bevindt (10-30 Hz). Hoge resonantiefrequenties (tot 60 Hz) worden slechts enkele malen gemeten. Om voor deze frequenties een betrouwbaarder inzicht te hebben zijn meer metingen nodig.

Inleiding

De resonantiefrequentie (de frequentie waarop bodemlagen het meest gevoelig zijn om 'mee te trillen') van de ondiepe bodem (0 – 10 m – maaiveld) is afhankelijk van een complex stelsel aan factoren: diepte (dikte), dichtheid, compressibiliteit en rigiditeit van een aantal lagen. Omdat de ondiepe aarde geen homogeen medium is, zal resonantie tevens afwijken in x-, y- en z-richting. Ook is het moeilijk om op een locatie exact te voorspellen wat de bodemgelaagdheid is in termen van het genoemde stelsel fysische grootheden. Uit bovenstaande uitleg over de resonantiefrequentie volgt al snel dat het waarschijnlijk nauwkeuriger is om deze te meten in plaats van te voorspellen door berekening.

Metingen

Van 1999 – 2007 zijn in Nederland door TNO diverse seismische metingen verricht. Enkele hiervan zijn geschikt om de resonantiefrequentie in x-, y, en z-richting te bepalen. In totaal zijn 11 metingen, verdeeld over Nederland, m.u.v. Flevoland, Limburg en Zeeland, bekeken.

Als wordt gekeken naar het frequentiebereik tussen 1 en 60 Hz – hier wordt de meeste resonantie verwacht – blijkt uit de metingen, dat centrumresonantiefrequenties in 'slappe ondergrond', waar zich veel veen en slappe klei bevindt zich bevinden tussen de 4 en 10 Hz. Als zich voornamelijk zand bevindt in de ondergrond is deze frequentie hoger en zal tussen de 10 en 30 Hz liggen. Omdat zand, veen en kleilagen in vele mengingen en combinaties voorkomen, zal een combinatie van de twee genoemde frequentiebereiken ook kunnen voorkomen. Hoge resonantiefrequenties (tot 60 Hz) worden slechts enkele malen gemeten. Bandbreedte van de signalen (afstanden tussen de -3dB punten – waar de helft van de maximum amplitude ligt) is in de meeste gevallen groter dan 5 Hz. Het valt op, dat resonantie in de verticale richting aanzienlijk kan verschillen van deze in horizontale richting.

Enkele voorbeelden van resonantiefrequenties zijn weergegeven in onderstaande figuren, steeds bestaande uit een linkerkolom (blauw), met hierin de resonantiefrequentie in x-(boven), y-(midden), en z-richting(onder). In de rechterkolom (zwart) staan de ratio's tussen horizontale en verticale componenten, deze worden met name gebruikt in onderzoek naar schaderisico bij aardbevingen. De x- en y-component hebben geen vaste azimuth, maar staan wel altijd loodrecht op elkaar.

