

Geo-Impuls Pilot Julianakanaal

Geofysisch onderzoek kadestabiliteit en kanaalbodem

Marco de Kleine
Andre Koelewijn
Arjan Venmans

1209346-008

Titel
Geo-Impuls Pilot Julianakanaal

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Stuurgroep Geo-Impuls	1209346-008	1209346-008-GEO-0001	20

Trefwoorden
Maasroute fase 2, Julianakanaal, kadestabiliteit , geofysische methoden, reflectie-seismiek, grondradar, Side Scan Sonar.

Samenvatting
Dit rapport geeft een samenvatting van de pilot Julianakanaal van Geo-Impuls. De pilot betreft het uitvoeren van geofysische metingen op de kaden en op het water. Het doel van de metingen was:


- 1 Het identificeren van een laag fijn zand die door kwel kan verweken, waardoor de stabiliteit van de kanaalkaden wordt bedreigd.
- 2 Het verkrijgen van inzicht in de opbouw van de kaden om doelgericht nader onderzoek naar de sterkte-eigenschappen te kunnen uitvoeren
- 3 Het identificeren van obstakels op de kanaalbodem.

Voor doelen 2 en 3 (grondopbouw onder en in kanaalkaden) bleken de seismische S-golf metingen en de grondradarmetingen het meest succesvol. Deze laten duidelijk gelaagdheden in en onder de dijk zien. De P-golf-metingen laten vooral reflecties (ver) onder de dijk zien. De oppervlaktegolf-metingen tonen laterale variaties maar hebben een te lage resolutie voor een gedetailleerde interpretatie. De grondradarmetingen op het water bleken niet te functioneren, maar op de kade tonen de metingen duidelijk de aanwezigheid en omvang van de leemlagen.

Voor doel 3 (obstakels in het kanaal) levert de Side Scan Sonar data gedetailleerde informatie op over de situatie op de kanaalbodem.

Door verschillende technieken te combineren is meer inzicht verkregen die met elke techniek apart niet verkregen kon worden. Ook heeft het geofysische onderzoek op enkele trajecten geleid tot een verkleining van de geotechnische risico's tijdens de uitvoering.

Referenties
Zie hoofdstuk 5.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	mrt 2015	Marco de Kleine André Koelewijn Arjan Venmans		Geo-Impuls Werk- groep Betrouwbaar Ondergrond Model		Joris van Ruijven	
2	Apr 2015	Marco de Kleine André Koelewijn Arjan Venmans		Geo-Impuls Werk- groep Betrouwbaar Ondergrond Model		Joris van Ruijven	

Status
definitief

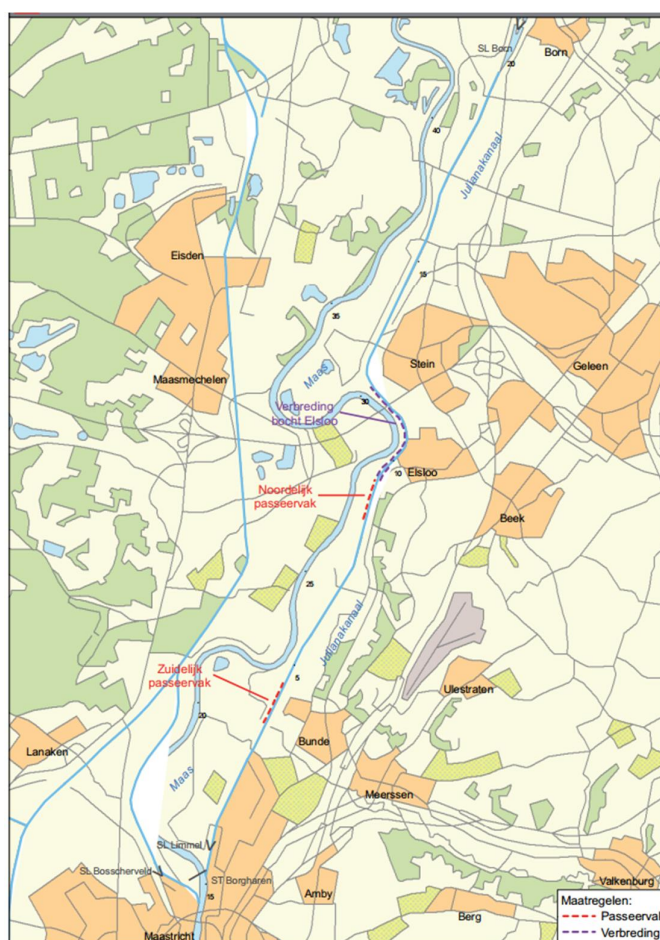
Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Achtergrond	1
1.2 Onderzoeksvragen	2
1.3 Probleemstelling en doelstelling onderzoek kadestabiliteit, vragen 7 en 8	2
1.4 Probleemstelling en doelstelling onderzoek kanaalbodem, vraag 9	3
1.5 Verantwoording en dankwoord	3
2 Metingen	4
2.1 Situatie	4
2.2 Methoden	4
3 Resultaten	6
3.1 Reflectie-seismiek op de kaden: S-golf en P-golf	6
3.2 Reflectie-seismiek op het kanaal: sub bottom profiler	8
3.3 Side Scan Sonar op het kanaal	8
3.4 Grondradar op de kaden en het kanaal	9
4 Evaluatie en conclusies	10
4.1 Evaluatie vraag 7: vóórkomen van fijn zand	10
4.2 Evaluatie vraag 8: opbouw van de kaden	10
4.3 Evaluatie vraag 9: obstakels op de kanaalbodem	10
4.4 Impact op risicoanalyse	10
4.5 Conclusies	10
5 Literatuur	12
A Beschrijving geofysische methoden	13
A.1 Algemene beschrijving seismiek	13
A.2 Reflectie seismiek	14
A.2.1 Principe	14
A.2.2 Toepassingen	15
A.2.3 Resolutie en dieptebereik	15
A.2.4 Beperkingen en ruis	15
A.2.5 Voorbeeld	15
A.3 Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW)	16
A.3.1 Principe	16
A.3.2 Toepassingen	17
A.3.3 Resolutie en dieptebereik	17
A.3.4 Beperkingen en ruis	17
A.3.5 Voorbeeld	18
A.4 Grondradar (GPR)	18
A.4.1 Principe	18
A.4.2 Toepassingen	19
A.4.3 Resolutie en dieptebereik	19
A.4.4 Beperkingen en ruis	19
A.4.5 Voorbeeld	19

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Rijkswaterstaat Maaswerken is voornemens in het kader van het deelproject Maasroute een aantal ingrepen uit te voeren in het Julianakanaal (zie Figuur 1.1). De ingrepen bestaan uit het moderniseren, verdiepen, en verbreden van het kanaal en het verbeteren van de oeverbescherming. Het doel van deze ingrepen is het kanaal geschikt te maken voor grotere schepen, klasse Vb.



Figuur 1.1: Julianakanaal Limmel – Born met locatie van werkzaamheden

Over een groot deel van het traject ligt het kanaal boven maaiveld tussen kaden. De uitbreiding van het kanaal vraagt op een aantal locaties om ingrepen in de kaden. De ondergrond onder het kanaal varieert van grof grind tot fijn zand. Vanwege de grote doorlatendheid van deze materialen is de kanaalbodem voorzien van een kleibekleding. Ook deze kleibekleding zal voor de uitbreiding van het kanaal op een aantal locaties moeten worden doorgraven en aangepast. Bij deze ingreep mag geen lekkage van het kanaal optreden of de kwel naar de omgeving veranderen.

In januari 2010 heeft Deltares een GeoRisicoScan uitgevoerd naar de beheersing van de ondergrond risico's [1]. Ook is een aanbeveling gedaan voor de beheersing van deze risico's. Dit heeft geleid tot een voorstel van Deltares aan de projectorganisatie, RWS Maaswerken.

1.2 Onderzoeksvragen

RWS Maaswerken, heeft in samenwerking met Deltares, een aantal onderzoeksvragen geformuleerd:

1. Wat is de dikte van de kleilaag welke de waterdichte bekleding vormt van het Julianakanaal, zowel op de bodem als op de taluds?
2. Bij de aanleg van het noordelijk deel van het kanaal is er gekozen voor een geringe vaardiepte. Is hiervoor een geologische verklaring?
3. Is het technisch mogelijk het noordelijk deel van het kanaal te verdiepen, m.a.w.: wat zijn de mogelijke gevolgen van deze verdieping (samenstelling vrijkomende grondstromen, geohydrologie). En in het bijzonder: Wat zijn de risico's voor de Kingbeek?
4. In sommige gebieden langs het kanaal is er sprake van kwel. Wat is de bron van deze kwel (natuurlijk of het kanaal) en valt deze te kwantificeren?
5. Kan de huidige kwel situatie in kaart worden gebracht en kan de ontwikkeling van de kwel gemonitord worden? Deze vragen hebben een tweeledig doel:
 - a. Mogelijke noodzakelijke maatregelen treffen tegen kwel.
 - b. Controle van de werkzaamheden van de aannemer (is de nieuwe kanaaldijk waterdicht, zijn herstelwerkzaamheden goed uitgevoerd).
6. Met welke risico's vanuit de ondergrond en de geohydrologie dient rekening gehouden te worden bij de geplande werkzaamheden;
 - a. In algemene zin?
 - b. Is de uitvoeringswijze waarbij het kanaal niet geheel gestremd wordt geotechnisch en hydrologisch gezien haalbaar?
7. Op welke locaties komt fijn zand voor dat kan verweken door kwel tijdens de ingreep aan het kanaal?
8. Waar moet nader grondonderzoek worden uitgevoerd om vast te stellen of de kaden voldoende stabiel zijn tijdens de ingreep aan het kanaal?
9. Welke objecten bevinden zich op de kanaalbodem die invloed kunnen hebben op de werkzaamheden: puin, autowrakken, grind, stenen?

Om deze vragen te kunnen beantwoorden heeft Deltares voor RWS Maaswerken een gefaseerd projectplan gemaakt. De vragen 1 tot en met 6 worden beantwoord in het rapport 'Geofysisch onderzoek Julianakanaal' dat Deltares in opdracht van RWS Maaswerken heeft opgesteld [2]. De Geo-Impuls pilot betreft aanvullende metingen ter beantwoording van de vragen 7 (voorkomen fijn zand), 8 (samenstelling en sterkte-eigenschappen kaden) en 9 (objecten op de kanaalbodem). De resultaten van de metingen in de pilot zijn toegevoegd aan het rapport voor RWS Maaswerken [2].

1.3 Probleemstelling en doelstelling onderzoek kadestabiliteit, vragen 7 en 8

De uit archieven beschikbare informatie is zeer schaars, met afstanden tussen onderzoekpunten in de orde van honderden meters. Bij de traditionele benadering zou de aanvullende informatie voor analyse en ontwerp worden ingewonnen met behulp van boringen en sonderingen. Naast verschillende voordelen hebben deze technieken vooral het nadeel dat er alleen puntinformatie ingewonnen wordt. Het verloop van de lagen in de ondergrond tussen de meetpunten kan alleen worden geschat op basis van de informatie uit de meetpunten zelf. Zeker in die gebieden waar de opbouw van de ondergrond mede beïnvloed is door de mens, zoals bij het Julianakanaal, is het voorspellen van de opbouw van de ondergrond tussen meetpunten complex. Opbouw en eigenschappen van het

ondergrondmodel zijn daarmee onzeker, en de resultaten van de geotechnische ontwerpberekeningen ook.

Meer zekerheid kan worden verkregen door veel boringen en sonderingen uit te voeren. Vanwege de bereikbaarheid van de locatie (kanaaltaluds) is dit kostbaar. Ook is het onzeker of met sonderingen de gewenste onderzoeksdiepte wordt bereikt vanwege grind en puin in de ondergrond en kaden. Tenslotte kan de dichtheid van de onderzoekspunten tevoren niet goed worden ingeschat vanwege de verwachte chaotische opbouw van de kaden.

Doel van het project is de samenstelling van de kanaaldijk in meer detail in kaart te brengen. De beschikbare informatie met betrekking tot de opbouw van de dijken zelf is beperkt. Omdat de kanaaldijken en het kleisperm in het kanaal onnatuurlijk zijn, kunnen niet alle bestaande vragen alleen met 'geo' kennis en op basis van bestaande gegevens worden beantwoord. De geologische setting van het gebied gecombineerd met de bijzondere ligging van het kanaal (waterspiegel enkele meters boven maaiveld) zorgen ervoor dat uit te voeren van ingrepen technisch gezien complex zijn en mogelijk grote gevolgen kunnen hebben op de lokale (grond)waterhuishouding.

Metingen ter plaatse zijn nodig om alle vragen in voldoende detail te kunnen beantwoorden. Het onderzoek wordt uitgevoerd op een pilotlocatie in de bocht van het Julianakanaal bij Elsloo. De locatie ligt op de overgang van het Maasdal naar een Maasterras. Dit betekent dat er in de ondergrond van het kanaal een scherpe laterale overgang zit van grindafzettingen naar fijn zand afzettingen. Tijdens de aanleg van het kanaal heeft in het fijne zand verweking plaatsgevonden en is instabiliteit opgetreden. In de kanaaldijk is een drainagebuis aangelegd om het water af te voeren.

1.4 Probleemstelling en doelstelling onderzoek kanaalbodem, vraag 9

De ingrepen aan de kanaalbodem kunnen worden gehinderd door obstakels van verschillend karakter en grootte, zoals autowrakken, puin, grind en stenen. Informatie over het voorkomen van deze obstakels is verstrekt aan de inschrijvers op het contract voor de verruiming van het kanaal, zodat zij hun werkwijze hierop kunnen aanpassen.

1.5 Verantwoording en dankwoord

Dit rapport is een samenvatting van het uitgebreide meetrapport over de metingen [2].

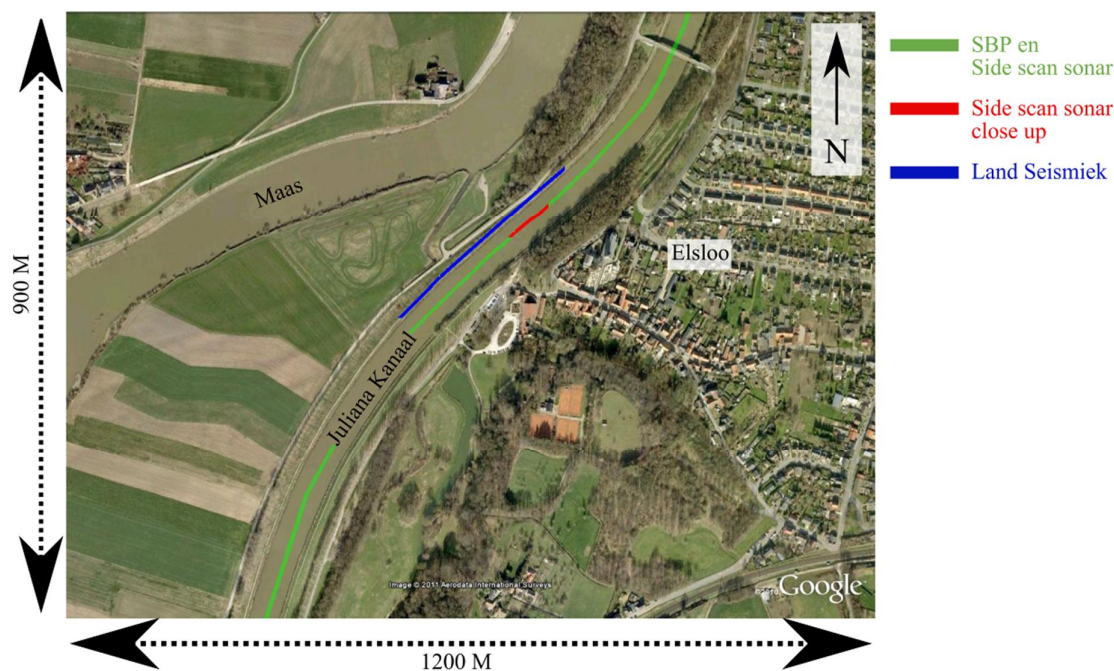
Dank is verschuldigd aan Rijkswaterstaat voor de toestemming om de metingen openbaar te maken. Ook danken de auteurs Geosym - Geomesssysteme voor hun ondersteuning bij de acquisitie van de seismische data op het land, en het Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG, Hannover) voor de hulp bij het verwerken van deze data.

2 Metingen

2.1 Situatie

Het kanaal bevindt zich in een door de Maas gevormd landschap. De ondergrond bestaat uit klei, leem, zand en grind. Het kanaal is gedeeltelijk op het oorspronkelijke maaiveld aangebracht en gedeeltelijk ingegraven in de Maasterrassen. De bekleding van het kanaal bestaat vooral uit klei/leem van verschillende sortering, dikte en doorlatendheid. Op sommige plekken is bevat de bodem van het kanaal grind en stenen. In deze geologische setting is lekkage van het kanaal naar de omgeving tijdens de werkzaamheden een significant risico.

Om de werkzaamheden aan te kunnen passen aan de specifieke situatie te plekke is besloten om een aantal geofysische technieken in te zetten om de ondergrond onder het kanaal en een gedeelte van de dijk te karteren. Bij Elsloo zijn de verschillende technieken parallel ingezet om zodoende een compleet beeld van het kanaal en de dijk te verkrijgen, zie Figuur 2.1. De ruimte voor het kanaal is daar erg beperkt, tussen Elsloo in het oosten en de Maas in het westen. In het zuiden ligt het kanaal nog op het maaiveld, waar het in het Noorden ingegraven is in de Maasterrassen.



Figuur 2.1: Locatiekaart van de metingen bij Elsloo. Met blauw is het traject op de dijk aangegeven waar, P, S en Oppervlakte golven metingen uitgevoerd zijn, groen geeft het traject aan waar chirp en Side Scan Sonar data verworven is. In het rood is het stukje Side Scan Sonar aangegeven dat in Figuur 3.3 getoond wordt. De geringe afstand tussen de Maas en het kanaal is goed zichtbaar. In de velden tussen het kanaal en de Maas is tevens het hoogteverschil van de Maasterrassen te zien.

2.2 Methoden

Tabel 2.1 geeft een inschatting van de slaagkans van de geofysische meetmethoden in relatie tot de doelen van de pilot.

Methode	Vraag 7: vóórkomen van fijn zand	Vraag 8: opbouw kaden	Vraag 9: obstakels kanaalbodem
Op de kaden			
Reflectie-seismiek: S-golf	+	+	
Reflectie-seismiek: P-golf	+	-	
Oppervlaktegolf-dispersie: Consolitest	o	+	
Grondradar (GPR)	-	o	
Op het kanaal			
Reflectie-seismiek: sub bottom profiler (SBP)			o
Dual Frequency Echosounder			o
Side Scan Sonar			+
Grondradar (GPR)			o

Tabel 2.1: Overzicht gebruikte technieken en doelen voor de geofysische technieken.
+ meetbaar, o mogelijk meetbaar – niet meetbaar.

Op grond van deze inschatting is vastgesteld dat een combinatie van geofysische technieken de grootste kans van slagen en mate van detail bieden die nodig zijn voor dit project.

Op de kaden zijn P-golf en S-golf reflectie-seismiek en oppervlaktegolf-dispersie gemeten. De reflectiemetingen zijn uitgevoerd met behulp van een kleine vibratorbron en een sleepkabel met opnemers. Voor de oppervlaktegolf-metingen is gebruik gemaakt van een hamer. Op het kanaal is gebruik gemaakt van een sub bottom profiler (SBP).

Op het kanaal is, naast de SBP, ook een Side Scan Sonar ingezet om objecten te detecteren en het bodemtype te classificeren. Zowel de Side Scan Sonar-metingen als de SBP-metingen werden over het hele kanaal uitgevoerd.

Tevens zijn grondradar (GPR) metingen verricht op de dijk en op het water. Hoewel deze locaties niet exact samenvallen met de seismiek op de dijk, laten de metingen duidelijk zien welke informatie ze opleveren. Op het water werden de GPR antennes in een rubberboot achter het onderzoeksschip aangesleept. Op het land zijn stroken loodrecht op de dijk gemeten met behulp van een 250 MHz antenne. De metingen zijn gevalideerd met een aantal handboringen.

Een verdere beschrijving van de P-golf en S-golf reflectie seismiek, oppervlaktegolf-dispersie en grondradar is gegeven in Bijlage A.

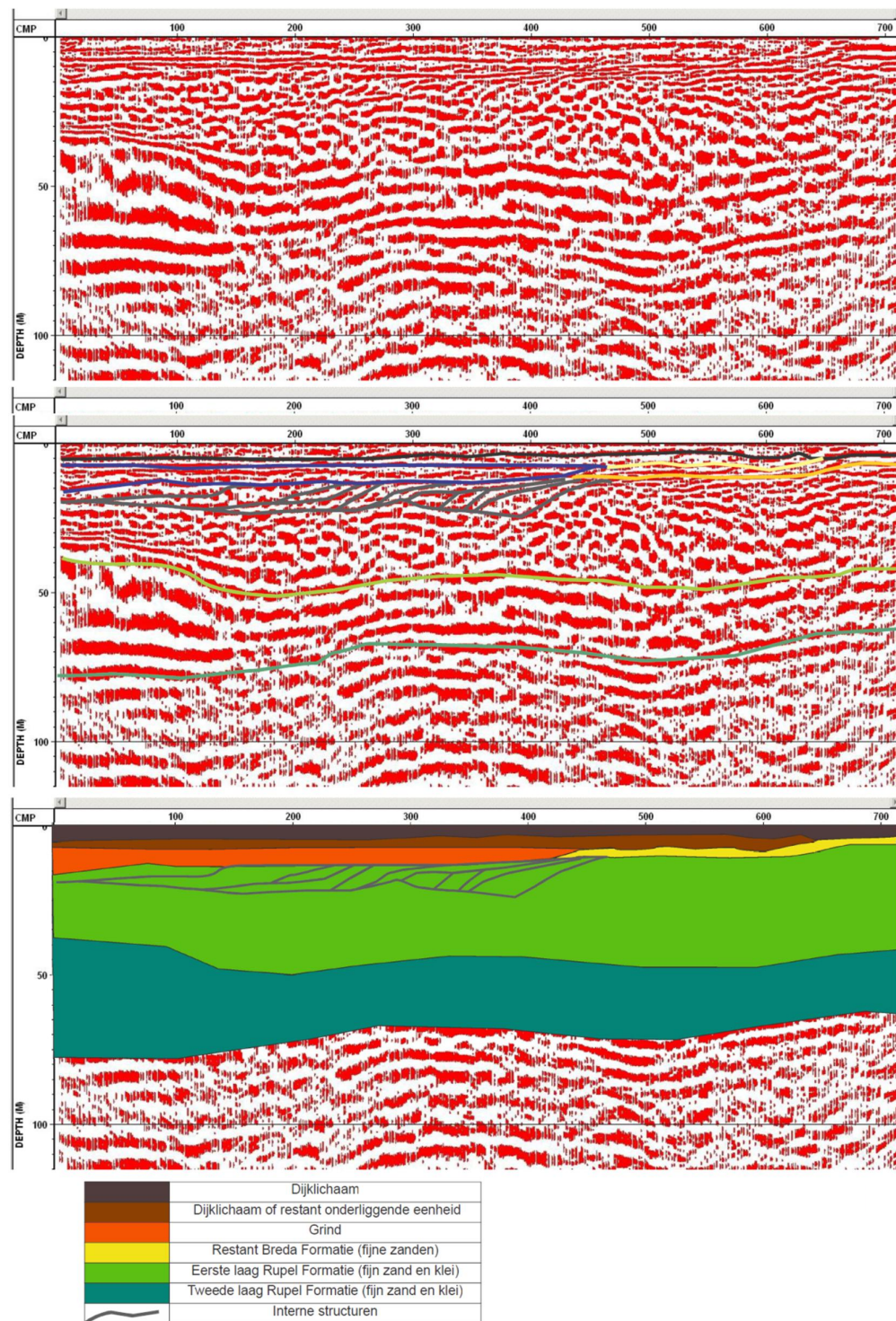
3 Resultaten

3.1 Reflectie-seismiek op de kaden: S-golf en P-golf

De kwaliteit van de S-golf metingen is goed. Met name tot 75 meter onder maaiveld zijn goed vervolgbare reflectoren zichtbaar (Figuur 3.1, boven). IJking van dit type data met boringen en/of sonderingen wenselijk is. Deze gegevens zijn niet alleen belangrijk voor het koppelen van reflectoren aan overgangen in de ondergrond maar ook vertaling van de tijd secties naar diepte secties. Seismische data wordt opgenomen in tijd (de tijd die een golf onderweg is van de bron via een reflector naar de ontvanger). Voor praktische toepassingen moeten deze tijd secties omgezet worden naar diepte secties. Dit heet een tijd-diepte conversie. Deze kan gemaakt worden door belangrijke reflectoren te koppelen aan een overgang waarvan de diepte bekend is of door het uitvoeren van snelheidsmetingen in een boorgat of met een sondering. Op het tracé van de metingen is maar een enkele sondering beschikbaar en geen snelheidsmeting. De tijd-diepte conversie is dus uitgevoerd met geschatte snelheden op basis van de lithologie die in de sondering is aangetroffen. Indien de feitelijke snelheden afwijken van het berekende snelheidsmodel kan de diepteligging van de reflectoren afwijken ten opzichte van de huidige interpretatie.

Figuur 3.1 geeft het seismische profiel en de interpretatie in 3 stappen weer. Figuur 3.1 (boven) geeft de ruwe data (diepte sectie), Figuur 3.1 (midden) geeft de interpretatie van de meest relevante reflectoren weer. (onder) geeft de indeling van de ondergrond in eenheden weer, gebaseerd op de seismische interpretatie. Op het profiel worden dieptes ten opzichte van het maaiveld weergegeven. Het maaiveld ligt op circa 47 meter boven NAP. Op het profiel is goed te zien dat het als maasgrind geïnterpreteerde pakket uitwigt (dunner wordt) naar het noorden en vanaf station 450 niet meer aanwezig is onder de kanaaldijk. Ook de overgang van de natuurlijke ondergrond naar het dijklichaam is goed zichtbaar. Binnen dit lichaam zijn niet veel structuren zichtbaar, dit kan betekenen dat het lichaam akoestisch gezien homogeen is (geen grote variaties in eigenschappen) of dat de resolutie van de seismiek te laag was om in de bovenste meters te kunnen vervolgd.

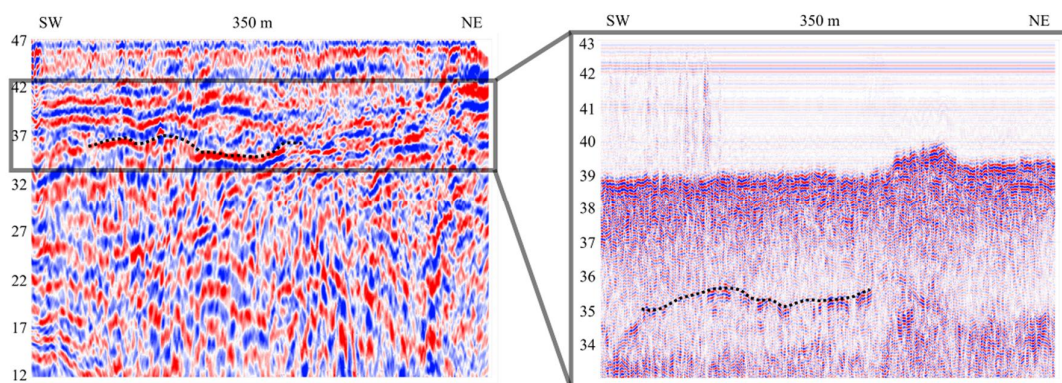
De kwaliteit van de P-golf metingen is gemiddeld tot goed, de datakwaliteit varieert meer dan die van de S-golf seismiek. Ten opzichte van de S-golf seismiek levert de P-golf seismiek weinig toegevoegde waarde met betrekking tot de interpretatie van ondiepe (voor dit project relevante) laagovergangen. De ondiepe reflectoren die waargenomen konden worden zijn in overeenstemming met die uit de S-golf seismiek. De interpretatie van de P-golf metingen is daarom niet opgenomen in dit rapport.



Figuur 3.1: Resultaten van de S-golf seismische metingen op de kade; de lengte van het profiel is ca. 360 m.
 Boven: ruwe data (in diepte)
 Midden: geïnterpreteerde reflectoren
 Onder: geïnterpreteerde eenheden

3.2 Reflectie-seismiek op het kanaal: sub bottom profiler

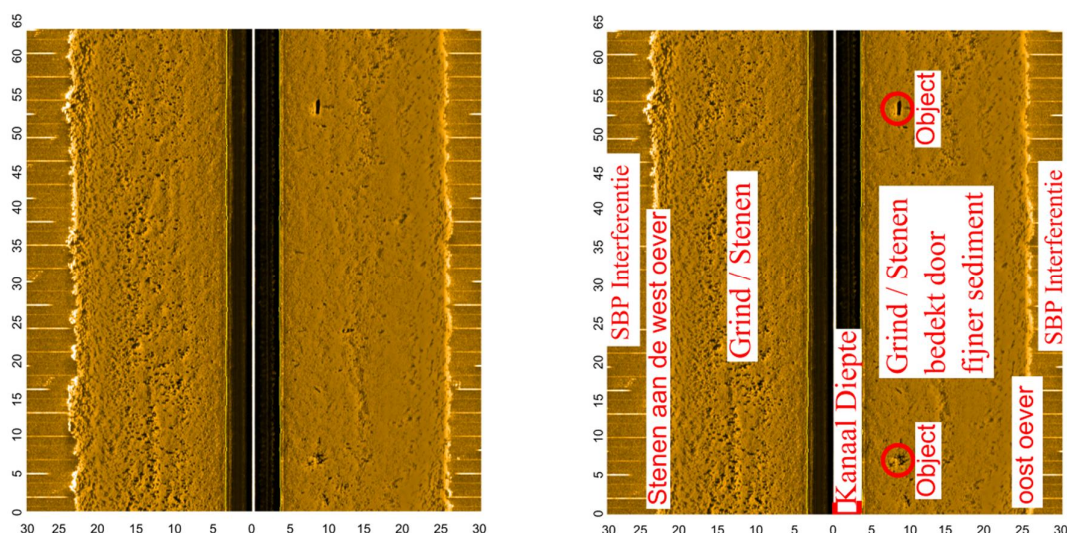
Omdat gebruik is gemaakt van verschillende seismische technieken met verschillende frequenties en snelheden, zijn de resoluties onderling sterk verschillend. De P-golf reflectie op land heeft een typische golflengte van 10 meter, de S-golf reflectie op land heeft een typische golflengte van 3 meter terwijl de SBP signalen een typische golflengte van 0.3 meter hebben. De P-golf dataset laat reflecties zien tot ongeveer 100 meter, maar heeft ondiep (minder dan 20 meter) nauwelijks resolutie. Tevens hadden de P-golf metingen het meeste last van de scheepvaart, de S-golf metingen hebben een veel hogere signaal/ruis-verhouding en laten veel meer reflecties zien. Figuur 3.2 laat een vergelijking zien tussen de S-golf reflectiemetingen op de dijk en de SBP-metingen op het water. De overgang tussen de dijk en de oorspronkelijke topografie is duidelijk te zien rond 42 meter NAP aan de zuidwest kant en verdwijnt geleidelijk naar het noordoosten, waar het kanaal in de oorspronkelijke topografie is ingegraven. De SBP data heeft een penetratiediepte van 5 tot 10 meter in het sediment. Naast de kanaalbodem is een andere reflector zichtbaar. Deze reflector is geïnterpreteerd als de overgang van zand naar maasgrind. Deze reflector is ook zichtbaar op het S-golfprofiel en aangegeven met de stippellijn in Figuur 3.2. Beide datasets tonen het uitwijken van deze grindlaag richting het noordoosten. De oppervlaktegolf-metingen laten laterale variatie zien, maar de kwaliteit was niet goed genoeg om een gedetailleerde interpretatie toe te passen.



Figuur 3.2: Resultaten van de seismische metingen. Links S-golfprofiel en rechts het SBP-profiel. De stippellijn geeft de bovenkant van het grindpakket aan dat in beide datasets zichtbaar is. De profielen zijn 350 meter lang en lopen van zuidwest naar noordoost. De aangegeven hoogtes zijn geschat aan de hand van de lithologie uit de sondering, aangezien er geen directe golfsnelheidsmetingen voorhanden waren.

3.3 Side Scan Sonar op het kanaal

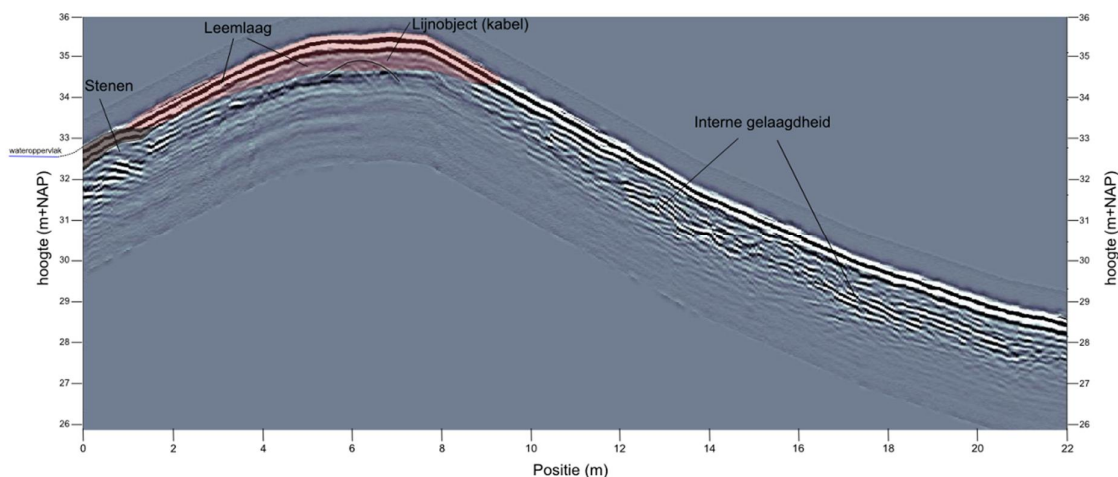
Langs het hele kanaal laten de Side Scan Sonar-beelden objecten (palen, autowrakken, onbekende objecten en scheepverkeer), verschillen in bodemruwheid, damwanden en stenen zien. Op het traject parallel aan de metingen op de dijk (zie Figuur 3.3) laat de Side Scan Sonar zien dat de westkant van het kanaal meer grind en stenen bevat dan de oostkant. Aan de oostkant liggen deze veelal onder fijner sediment. In het getoonde profiel zijn ook twee objecten aan de oostkant van het schip te zien. Doordat gelijktijdig met de SBP gemeten werd vindt er aan de randen van het plaatje interferentie plaats met het SBP-sigitaal.



Figuur 3.3: Gedeelte van de Side Scan Sonar data langs Elsloo, parallel aan de seismiek gemeten op de dijk. Dit figuur toont 65 meter opname van zuidwest (onder) naar noordoost (boven). Het kanaal is hier ongeveer 50 meter breed en 4 meter diep. Afstanden zijn gegeven in meters. De linker figuur toont de ruwe data, de rechterfiguur toont de interpretatie.

3.4 Grondradar op de kaden en het kanaal

De GPR resultaten op water vielen tegen. Het uitgestuurde signaal wordt volledig geabsorbeerd door de waterkolom voordat het weer ontvangen kan worden. Op sommige plekken is de waterbodem net zichtbaar op een diepte tussen de 4 en 7 meter. Het signaal is niet sterk genoeg om iets over het sediment te kunnen zeggen. Op de dijk waren de resultaten beter. De leemlagen zijn duidelijk zichtbaar in het GPR profiel en zijn ook geverifieerd met behulp van handboringen. Figuur 3.4 laat een GPR profiel in de buurt van Born zien. In het algemeen varieert de dikte van de leemlaag tussen de 20 en 30 cm aan de teen van de dijk tot 70 cm aan kruin. Tevens zijn de stenen aan de waterkant, interne gelaagdheid en een (lijn)object zichtbaar.



Figuur 3.4: GPR profiel door de westelijke kade loodrecht op het kanaal, bij Born. Het kanaal ligt links.

4 Evaluatie en conclusies

4.1 Evaluatie vraag 7: vóórkomen van fijn zand

De S-golf reflectie-seismiek op de kaden geeft inzicht in het voorkomen van fijn zand (Figuur 3.1). Op grond van deze resultaten kunnen locaties worden vastgesteld voor nader onderzoek naar de verwekingsgevoeligheid van deze zanden met boringen en sonderingen.

4.2 Evaluatie vraag 8: opbouw van de kaden

De opbouw van de kaden kan worden afgeleid uit de resultaten van de S-golf reflectie-seismiek (Figuur 3.1) en de grondradar (Figuur 3.4). Op grond van deze resultaten kan doelgericht nader onderzoek worden uitgevoerd met boringen, sonderingen en laboratoriumproeven naar de sterkte-eigenschappen van de grondlagen in de kaden.

4.3 Evaluatie vraag 9: obstakels op de kanaalbodem

De Side Scan Sonar resultaten geven een gedetailleerd beeld van de morfologie van de kanaalbodem en de daarop aanwezige objecten en obstakels (Figuur 3.3). Lokaal zijn grote obstakels op de kanaalbodem waargenomen. Bij het verdiepen van het kanaal zal rekening gehouden moeten worden met deze objecten en obstakels.

4.4 Impact op risicoanalyse

De uitgevoerde metingen vormden geen doel op zichzelf, maar zijn uitgevoerd ten behoeve van de uitvoering van het project Verruiming Julianakanaal. Aspecten als de (variatie in) de diepte en dikte van de grindlaag in de ondergrond en de leemlaag van de bekleding, maar ook de aanwezigheid van objecten als auto's en palen vormen relevante informatie bij de voorbereiding en uitvoering van de uitbreidingswerkzaamheden. Met alleen geotechnisch onderzoek, zoals boringen en sonderingen, is deze mate van detail niet te verkrijgen. Bovendien speelt daarbij het risico op beschadigen een rol.

In een geotechnische risicoscan is voor enkele deeltrajecten ingeschat welke risico's samenhangend met de ondergrond hier bestaan tijdens de uitvoering. Enkele daarvan hingen nadrukkelijk samen met de mogelijke aanwezigheid van losgepakte zandlagen dicht onder de bodem van het huidige kanaal. Al tijdens de bouw hebben deze nabij Elsloo tot verzakkingen geleid. Doordat er tegenwoordig zwaarder materieel wordt toegepast kunnen deze problemen opnieuw optreden, maar uiteraard alleen daar waar sprake is van losgepakt zand in de ondiepe ondergrond. Het hiervoor gepresenteerde onderzoek heeft voor een tweetal deeltrajecten, namelijk bij Urmond en bij Elsloo, de potentiële omvang van dit probleem verkleind.

Daarnaast heeft het GPR onderzoek op het land geleid tot een verkleining van het ingeschatte risico op instabiliteit van de taludbekleding.

4.5 Conclusies

Door verschillende geofysische technieken in te zetten is er meer inzicht verkregen over het Julianakanaal, de dijk en de ondergrond. De ene methode was duidelijk succesvoller dan de ander. Op het land bleken de S-golf metingen het meest succesvol. Deze laten duidelijk gelaagdheden in en onder de kade zien. De P-golf metingen laten vooral reflecties (ver) onder de kade zien. De grondradarmetingen op het water bleken niet te functioneren, maar op de dijk laten de metingen de aanwezigheid en omvang van de leemlagen duidelijk zien. De Side Scan Sonar data levert gedetailleerde informatie op over de situatie op de kanaalbodem. Door verschillende technieken te combineren is meer inzicht verkregen die

met elke techniek apart niet verkregen kon worden. Ook heeft het geofysische onderzoek op enkele trajecten geleid tot een verkleining van de geotechnische risico's tijdens de uitvoering.

5 Literatuur

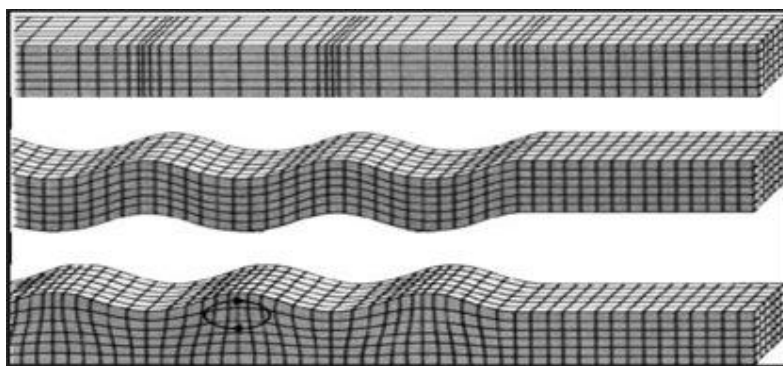
- [1] GeoDelft (2010). Verruiming Julianakanaal – GeouickScan en GeoCheck. Rapport 1201613-000-GEO-0005.
- [2] Deltares (2011). Geofysisch onderzoek Julianakanaal. Rapport 1202392-006-BGS-0004.
- [3] Deltares (2014). Geofysische methoden voor geotechnisch ingenieurs. Rapport 1202416-008-GEO-0006.
- [4] Telford, W. G. L. and Sheriff, R. (1990). Applied geophysics. Cambridge University Press.
- [5] http://www.epa.gov/esd/cmb/GeophysicsWebsite/pages/reference/methods/Surface_Geophysical_Methods/Seismic_Methods/Seismic_Reflection_Methods.htm [Online].
- [6] Park, C. B. ; Miller, R. D. ; Zia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves (MASW). Geophysics, vol. 64, no. 3, pp. 800-808.
- [7] Park, C. B.; Miller, R. D. (2005). Seismic characterization of wind turbine sites near Lawton, Oklahoma, by MASW method. Kansas Geological Survey.

A Beschrijving geofysische methoden

Bron: 'Geofysische methoden voor geotechnisch ingenieurs', Deltares [3]

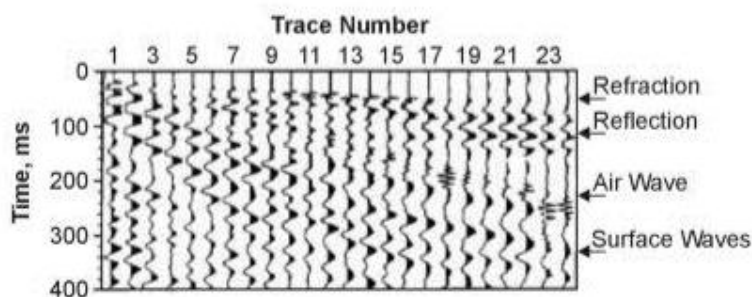
A.1 Algemene beschrijving seismiek

Een trilling in een medium, opgewekt door een seismische bron, plant zich in alle richtingen voort. De snelheid waarmee dit gebeurt, is afhankelijk van de akoestische eigenschappen van het medium. De voortplanting kan beschreven worden in verschillende typen golven [4] (Figuur A.5.1). Door de ondergrond lopen ruimtegolven en langs het oppervlakte lopen oppervlaktegolven. Daarnaast kan bij ruimtegolven de deeltjesbeweging in de richting van voortplanting zijn (druk golven) of er loodrecht op staan (schuifgolven). De verschillende golven zijn hierdoor gevoelig voor verschillende eigenschappen van het medium. Voor geotechnische toepassingen worden ruimtegolven gebruikt in klassieke reflectie seismiek om lagenpakketten in de ondergrond te visualiseren en in refractie-seismiek om de golfsnelheid en de dikte van de lagen te bepalen. Oppervlaktegolven geven inzicht in de schuifgolfsnelheid in de (on)diepe ondergrond die direct gerelateerd is aan de dichtheid en schuifmodulus. De oppervlaktegolf-techniek heet Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW).



Figuur A.5.1: Grafische weergave van verschillende seismische golven: Boven: compressie golf. Midden: schuif golf. Onder: oppervlakte golf.

Bij een seismische opname kunnen golven actief gegenereerd worden door bijvoorbeeld dynamiet, vibrator, valgewicht of hamer. Deze golven reizen door de ondergrond en langs de oppervlakte. Het signaal reflecteert aan fysische contrasten en wordt vervolgens opgevangen door een netwerk aan ontvangers (geofoons of hydrofoons). Een voorbeeld van een seismische opname met daarin de registratie van de verschillende type golven is weergegeven in Figuur A.5.2. Het type bron en ontvangers en het patroon van schoten en ontvangers is afhankelijk van de vraagstelling. De bron en ontvangers kunnen aan het maaiveld en/of in een boorgat geplaatst worden. Onder water worden andere typen bronnen en ontvangers (hydrofoons) gebruikt dan op land (geofoons). Een seismische conus kan een verticaal profiel van de seismische snelheden genereren (Vertical Seismic Profile, VSP).



Figuur A.5.2: Simpel seismogram met daarin de signalen van de verschillende golven. Horizontaal staan de registraties per geofoon weergegeven, verticaal de tijd [5].

A.2 Reflectie seismiek

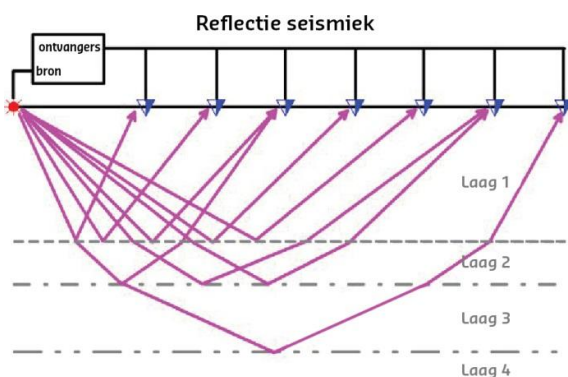
A.2.1 Principe

De seismische reflectie techniek is gebaseerd op het feit dat seismische energie bij een contrast in akoestische impedantie voor een deel gereflecteerd wordt [4]. Het andere deel van de energie gaat dieper de ondergrond in (transmissie) en reflecteert op een dieper impedantiecontrast. Dit principe is weergegeven in Figuur A.5.3. Akoestische impedantie (z) is het product van dichtheid (ρ) en de golfsnelheid (v):

$$z = \rho v \quad (1)$$

Contrasten in impedantie komen bijvoorbeeld voor bij overgangen tussen verschillende geologische eenheden.

Om het seismische profiel in tijd om te zetten naar een profiel in diepte is informatie nodig over de golfsnelheid. Deze conversie kan worden verkregen tijdens de processing of uit een sondering met een VSP-module (Vertical Seismic Profile) meting. Ook kunnen boringen of sonderingen met duidelijke laagovergangen helpen in het omzetten van tijd naar diepte.



Figuur A.5.3: Het principe van reflectie seismiek. De roze lijnen geven de golfpaden in de ondergrond aan. Het bijbehorende signaal van een reflectie is weergegeven in **Error! Reference source not found.**

A.2.2 Toepassingen

Reflectie seismiek wordt op grote schaal ingezet in de olie-en gasindustrie voor het karteren van reservoirs op grote diepte (compressiegolven). Voor ondiepe toepassingen wordt reflectie seismiek ingezet om inzicht te verkrijgen in de lokale gelaagdheid. In verband met de geringe diepte gaat het hierbij bijna altijd om het gebruik van schuifgolven. Compressiegolven kunnen pas ingezet worden bij een diepte groter dan ca. 25 m, vanwege de hoge compressiegolfsnelheid en daardoor langere golflengte van compressiegolven ten opzichte van schuifgolven. Voorbeelden van schuifgolf reflectie seismiek zijn het bepalen van de diepte en morfologie van de geologische basis (in Nederland vaak Pleistoceen zand), het detecteren van afsluitende lagen, lokaliseren van breuken, inzicht verkrijgen in gelaagdheid ten behoeve van het optimaal plaatsen van aanvullend grondonderzoek (boringen, sonderingen en monsternamen voor laboratoriumproeven).

A.2.3 Resolutie en dieptebereik

De resolutie en het dieptebereik van seismische golven variëren sterk. In de ondiepe ondergrond hangt de resolutie samen met de bron en de geologie. Over het algemeen is de resolutie van schuifgolven beter dan van compressiegolven, omdat de golflengte van schuifgolven kleiner is. De verticale resolutie bedraagt ca. 10% van de maximale onderzoeksdiepte. In het geotechnische diepte-bereik tot ca. 50 m-mv en bij gebruikelijke golfsnelheden in de Nederlandse ondergrond is de verticale resolutie van schuifgolfreflectie enkele meters tot 5 m. Dit betekent dat een laag van bijvoorbeeld een halve meter dikte niet kan worden onderscheiden met de methode. De horizontale resolutie hangt af van de afstand tussen de geofoons en van het ruisniveau.

A.2.4 Beperkingen en ruis

Equivalentie is niet van toepassing op reflectie seismiek. Er is geen inversie nodig voor het visualiseren van de reflecties in de ondergrond.

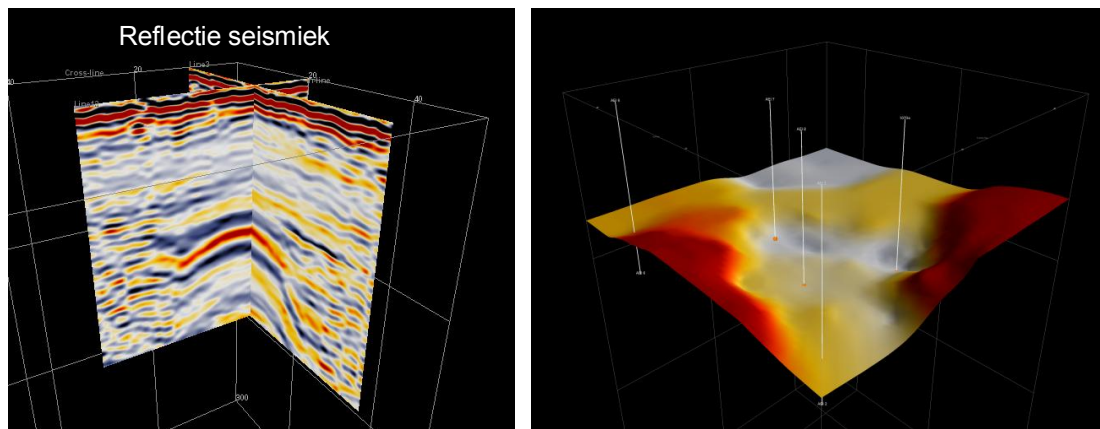
Voor de omzetting van tijd (gemeten in seismiek) naar diepte (relevant als eindresultaat) is niet altijd betrouwbare informatie beschikbaar. In dat geval zijn de dieptes niet of minder betrouwbaar. Reflecties worden veroorzaakt door een contrast in akoestische impedantie. Wanneer twee lagen een onderling gering verschil in akoestische impedantie hebben, zal geen reflectie optreden. Een verweerde of losse toplaag kan problemen geven. Dit kan opgelost worden door de bron of de bron en ontvangers onder de verweerde laag op enige diepte te plaatsen.

Ruisbronnen in een bebouwde omgeving zijn onder andere: autoverkeer, metro, tram, industriële ruis, wind, regen, 50 Hz stroomnet. Een deel van de ruis kan voorkomen worden door de kabels elektrisch goed af te schermen. In de kustzone geven de golven in de zee een achtergrondruis. Schuifgolven zijn gevoeliger voor ruis dan compressiegolven.

A.2.5 Voorbeeld

In Figuur A.5.4 is een voorbeeld van het gebruik van reflectie seismiek met schuifgolven te zien. Het doel van dit onderzoek was het visualiseren van de ondoorlatende laag op een locatie waar het plaatsen van CPT's door logistieke beperkingen nauwelijks mogelijk was. Het linker paneel van Figuur A.5.4 toont twee seismische profielen. De duidelijke reflectie, te zien als de rode lijn, geeft de ligging van een afsluitende laag aan. Het rechter figuur laat de morfologie van dit vlak zien, dat afgeleid is uit 18 seismische lijnen. Op deze locatie is een verontreiniging in het grondwater aanwezig, die zich ophoopt in het laagste punt op de afsluitende laag. Met behulp van de informatie uit de reflectie seismiek is te bepalen wat de beste locatie zal zijn voor saneringsputten. Op eenzelfde manier is voor geotechnische

toepassingen de optimale locatie te bepalen voor bijv. sonderingen, boringen en bemonsteringspunten ten behoeve van laboratoriumonderzoek.



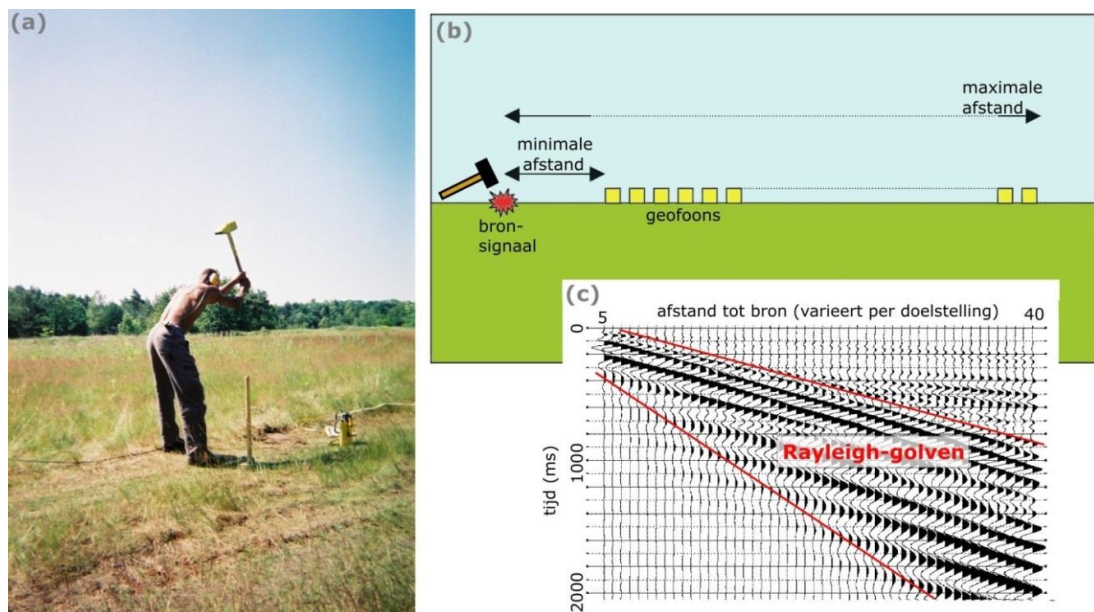
Figuur A.5.4: Voorbeeld van reflectie seismiek. Links: Twee snijdende seismische profielen met ieder een lengte van ca. 50 m. De kleurcodering geeft de sterkte van het seismische signaal weer. De reflectie op de ondoordringbare (afsluitende) laag is duidelijk te zien als rode lijn, op een diepte van 12 tot 15 m. Rechts: geïnterpreteerde morfologie van de afsluitende laag, gebruikt om de locatie van saneringsputten te optimaliseren. De kleuren geven de diepteligging weer van de afsluitende laag.

A.3 Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW)

A.3.1 Principe

MASW maakt gebruik van oppervlaktegolven [6]. Op land heten deze golven Rayleigh en Love golven, onder water Scholtegolven. Ze reizen vlakbij het grensvlak tussen lucht en grond of tussen water en bodem. De amplitude van oppervlaktegolven is groter dan van ruimtegolven. De snelheid van oppervlaktegolven hangt nauw samen met die van schuifgolven. Een korte golflengte wordt beïnvloed door de grondeigenschappen van een kleiner dieptetraject dan een langere golflengte. Uit de relatie tussen de frequentie van de golven en de snelheden waarmee deze reist, kan met behulp van inversie een verticaal profiel worden afgeleid van de schuifgolfsnelheid. Voor een bepaalde verdeling van dichtheden en snelheden in de ondergrond kan een theoretische dispersiecurve worden berekend. Deze wordt vergeleken met de gemeten dispersiecurve. Via een zoekalgoritme wordt gezocht naar het model van de ondergrond dat de kleinste afwijking vertoont tussen de gemeten en de theoretische dispersie curve. Per schot en reeks ontvanger wordt er een 1D model van schuifgolfsnelheid V_s verdeling in de ondergrond verkregen.

Net als bij refractie en reflectie seismiek worden bron en ontvangers op het maaiveld geplaatst. Figuur A.5.5 geeft het principe van MASW weer. Door het schot en het array aan ontvangers steeds te verplaatsen kan een 2D beeld verkregen worden van V_s in de ondergrond.



Figuur A.5.5: Het a) Met een slag van een hamer op een plaat worden trillingen opgewekt. B) De trillingen planten zich voort in de diepte, maar vooral langs het oppervlak. Deze oppervlaktegolven worden geregistreerd door geofoons. De configuratie van de geofoons is vergelijkbaar als bij reflectie en refractie seismiek. C) voorbeeld van een golfregistratie uit het veld.

A.3.2 Toepassingen

MASW wordt gebruikt in de geotechniek bij onderzoek aan bijvoorbeeld de fundering van windturbines, dijken, bepalen van de grenzen van stortplaatsen en inschatten van ondergrond gerelateerde aardbevingsrisico's, inschatten van de schuif modulus. Ook kan de ligging van het Pleistocene zand afgeleid worden met MASW. Het is een snelle methode die een indicatie geeft van de lagen en van de stijfheid van de bodem.

A.3.3 Resolutie en dieptebereik

Het dieptebereik van een oppervlaktegolf is ongeveer 1 golflengte door de sterkte demping met de diepte. Voor de schuifgolfsnelheden in de Nederlandse ondergrond is het maximale dieptebereik ongeveer 30 m. De verticale resolutie is 10% tot 20% van de diepte.

A.3.4 Beperkingen en ruis

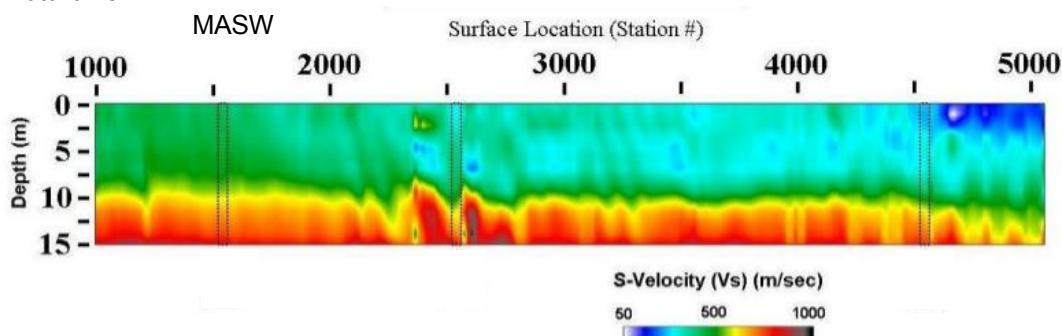
MASW geeft de gemiddelde laagopbouw van de bodem weer over de lengte van het ontvanger netwerk. Laterale verschillen die op kleine schaal optreden kunnen met deze methode niet gedetecteerd worden. Primair doel van MASW is niet het geven van laagopbouw, maar het afleiden van de schuifgolfsnelheid die direct gerelateerd is aan de schuif modulus en dichtheid van de ondergrond.

Om een profiel van de schuifgolfsnelheid af te leiden is inversie nodig. Hierbij speelt het equivalentieprobleem. Dit kan teruggebracht worden door vooraf bekende informatie mee te nemen in de inversie. Tevens kan door het doen van veel inversies de bandbreedte van aannemelijke ondergrondmodellen worden bepaald.

De ruisbronnen zijn hetzelfde als voor reflectie seismiek, namelijk autoverkeer, metro, tram, industriële ruis, wind, regen, 50 Hz stroomnet en de zee. Een deel van de ruis kan voorkomen worden door de kabels elektrisch goed af te screenen.

A.3.5 Voorbeeld

MASW wordt gebruikt om de stijfheid van de grond te onderzoeken en mogelijke holtes en zwakke zones te identificeren voor bijvoorbeeld de bouw van windturbines. In Figuur A.5.6 is een voorbeeld te zien van het resultaat van een MASW studie [7]. Met MASW is een 2D profiel van de schuifgolfsnelheid gegenereerd. Daarmee zijn de stijfheid van de bodem, de diepte en morfologie van het vaste gesteente, zwakke zones en mogelijke holtes afgeleid. In totaal zijn 69 anomalieën geïdentificeerd die leiden tot aanpassingen in de plaatsing van de windturbine.

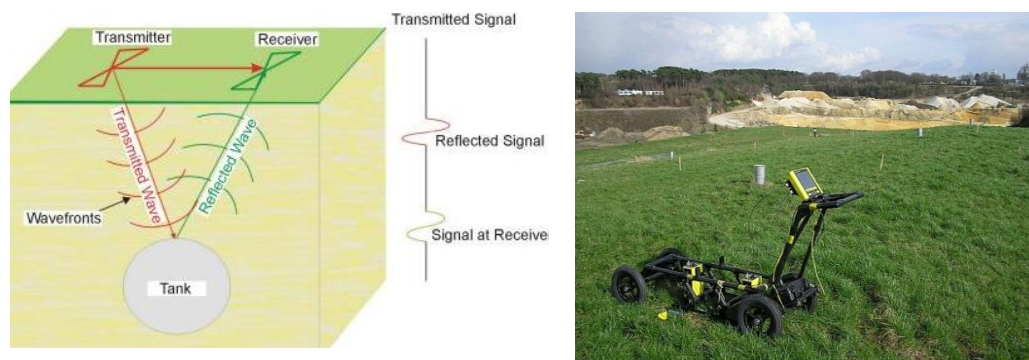


Figuur A.5.6: Voorbeeld van resultaat van MASW: laterale en verticale variatie in schuifgolfsnelheid ten behoeve van de plaatsing van een windturbine. Het profiel is ongeveer 60 m lang [7][6].

A.4 Grondradar (GPR)

A.4.1 Principe

Bij grondradar (ground-penetrating radar, GPR) worden elektromagnetische pulsen uitgezonden (50-2000 MHz). Deze pulsen worden – analoog aan het akoestische signaal bij seismiek – gereflecteerd door structuren in de ondergrond. Een grondradar bestaat uit een bron (zend antenne) en veelal één ontvangst antenne (Figuur A.5.7). Door de grondradar antennes over het maaiveld te slepen, kan een profiel van het signaal worden verkregen. Het resulterende radargram (GPR) lijkt erg op een seismogram (seismiek). De reflecties van het grondradar signaal worden echter veroorzaakt door een ander fysisch contrast, namelijk de mate waarin een medium elektrische lading vast kan houden in de ondergrond (diëlektrische constante). De diëlektrische constante varieert met vochtverschillen en type ondergrond.



Figuur A.5.7: Links: Het principe van grondradar. De zendantenne stuurt een korte elektromagnetische puls de bodem in. Na reflectie op een contrasterende laag of object wordt het signaal opgevangen door de ontvanger antenne. Bron: Central Federal Lands Highway (www.cflhd.gov). Rechts: GPR apparatuur.

A.4.2 Toepassingen

GPR kan onder andere worden ingezet om ruimtelijke informatie te verkrijgen over de lagenstructuur in de ondiepe ondergrond, het lokaliseren van ondergrondse kabels, leidingen, tanks en andere objecten, holtes en het bepalen van de grondwaterspiegel.

A.4.3 Resolutie en dieptebereik

Bij GPR is er een wisselwerking tussen resolutie en penetratie van het signaal naar de diepte. Over het algemeen geldt dat hogere frequenties meer resolutie geven (kortere golflengte), maar een geringer dieptebereik hebben (grotere demping). De doordringingsdiepte van de pulsen wordt bepaald door de samenstelling van de ondergrond (hoe grofkorreliger hoe dieper) en de kwaliteit van het grondwater (hoe meer geleidende opgeloste stoffen hoe ondieper). Voor droog zand is het dieptebereik met een antenne van 500 MHz van enkele meters. Lagere frequenties reiken dieper. Onder de grondwaterspiegel neemt het dieptebereik verder af. Op de Veluwe kan de grondwaterspiegel op een diepte van ca. 20 m gedetecteerd worden met een laag-frequente GPR antenne (bijv. 80 MHz). Verder naar het westen neemt het dieptebereik af, door de hogere grondwaterspiegel, de aanwezigheid van meer klei en veen en door meer zout in de bodem. In klei is het dieptebereik zeer gering door de grote demping van het signaal. Vanwege de grote porositeit van veen is het dieptebereik in veen zeer afhankelijk van het poriewater. Over het algemeen neemt het dieptebereik af van droog zand via nat zand naar veen/klei. Per situatie en verwachte grondsoort zal bekeken moeten worden voor welke frequentie het beste resultaat en dieptebereik verwacht kan worden. De resolutie hangt samen met de golflengte van het signaal. Voor een 500 MHz antenne en droog zand is de resolutie enkele decimeters.

A.4.4 Beperkingen en ruis

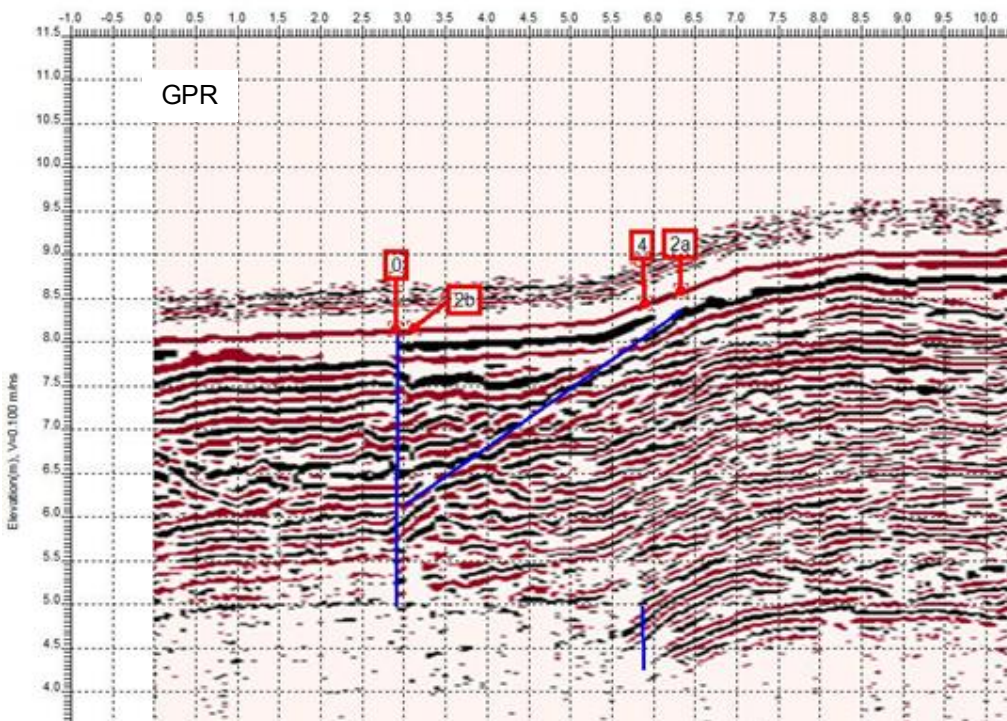
Het GPR signaal wordt sterk gedempt door klei in de ondergrond. Ook zout en brak grondwater dempt het signaal sterk. Hoe elektrisch geleidender het grondwater is, hoe sterker het signaal wordt gedempt.

Ruisbronnen hangen af van het type GPR dat gebruikt wordt. Indien een niet-afgeschermd grondradar wordt gebruikt (unshielded) dan zijn ook radiosignalen en bovengrondse stalen objecten bronnen van ruis. De bovengrondse objecten zijn goed te herkennen in de gemeten data (door de golfvoortplantingssnelheid in lucht), zodat er rekening mee kan worden gehouden in de interpretatie en eenvoudig te verwijderen is. Verder zorgt slechte koppeling van de antenne met de grond (bijv. door begroeiing) ervoor dat het signaal niet de bodem ingaat, maar door de lucht. Deze puls overstemt het signaal dat de bodem in gaat en reflecteert aan structuren of objecten in de bodem.

A.4.5 Voorbeeld

Grondradar kent veel toepassingen in de geotechniek. Een voorbeeld is gegeven in Figuur A.5.8. In verband met de verbreding van een snelweg was inzicht nodig in de opbouw van het grondlichaam naast de huidige weg. Het verschil in indringingsdiepte van het GPR signaal bij punt 4 geeft aan dat het verticaal ingegraven zandcunet zich rechts van punt 4 bevindt. Aan de andere zijde van het profiel, links van punt 0, is de oorspronkelijke bodem (veen) te zien. Daartussen bevindt zich een zone, in de driehoek gevormd door 2a, 2b en de schuine blauwe lijn met mengsel van oorspronkelijk materiaal en zand dat bij de aanleg van het zandcunet aan de zijkant geplaatst is. Voor de interpretatie is kennis van de oorspronkelijke aanlegwijze nodig, geleverd door geotechnisch ingenieurs. De interpretatie van welk materiaal zich waar bevindt is van belang bij de ontwerpfase van de wegverbreding. Met deze interpretatie gaan geotechnisch ingenieurs vervolgens weer aan de gang. Dit is een voorbeeld van het belang

van samenwerking tussen geofysici en geotechnisch ingenieurs en de communicatie die er tussen beiden nodig is.



Figuur A.5.8: Voorbeeld van grondradar (GPR) resultaat voor onderzoek naar de verbreding van een snelweg op slappe grond in Nederland. De zwart-rode lijnen even het grondradarsignaal weer. De patronen duiden op reflecties van het GPR signaal. De oorspronkelijke bodem (veen) bevindt zich links van 0, terwijl rechts van 4 het verticaal ingegraven zandcunet zichtbaar is. In de driehoek tussen 2a, 2b en de schuine blauwe lijn ligt een zone met een mengsel van oorspronkelijk materiaal met cunet zand.