



Deltares

Geofysische methoden

voor geotechnische ingenieurs

Bruno Zuada Coelho
Giovanni Diaferia
Pauline Kruiver
Arjan Venmans

1202416-008

Titel

Geofysische methoden

Opdrachtgever

Geo-impuls

Project

1202416-008

Kenmerk

1202416-008-GEO-0006

Pagina's

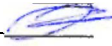

47

Trefwoorden

Geotechniek, geofysica, seismiek, elektrische methoden, elektromagnetische methoden, magnetische methoden, zwaartekrachtsmethoden, boorgatmeten, speciale conussen

Samenvatting

Deze handleiding helpt geotechnisch ingenieurs en hun opdrachtgevers te bepalen welke geofysische technieken geschikt zijn als methode van grondonderzoek om specifieke geotechnische vragen te beantwoorden. De opzet van de handleiding sluit aan bij de Geo-Impuls / CUR Richtlijn C247 'Risico gestuurd grondonderzoek', die vooral traditionele methoden van grondonderzoek behandelt. Ook geeft deze handleiding achtergrondinformatie over de geofysische technieken, en richtlijnen voor te verstrekken informatie en rapportage.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
9	April 2015	Bruno Zuada		Geo-impuls		Joris van Ruijven	
		Coelho		wergroep			
		Giovanni Diaferia					
		Pauline Kruiver					
		Arjan Venmans					

Status

definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
2 Achtergrondinformatie	2
3 Opzet van geofysisch onderzoek	4
3.1 Onderzoeksstrategie	4
3.2 Doelstellingen	5
3.3 Onderzoeksspecificatie	6
3.4 Uitvoering en rapportage	7
4 Selectie van geschikte geofysische methoden	9
5 Geofysische methoden	11
5.1 Inleiding	11
5.2 Seismische methoden	12
5.2.1 Algemene beschrijving seismiek	12
5.2.2 Reflectie seismiek	14
5.2.3 Refractie seismiek	16
5.2.4 Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW)	18
5.2.5 Cross-hole en downhole methoden	20
5.3 Elektrische methoden	21
5.3.1 Elektrische weerstandsmethode (Electrical Resistivity Tomography, ERT)	21
5.3.2 Spontane Potentiaal methode (SP)	23
5.3.3 Geïnduceerde polarisatie (IP)	25
5.4 Elektromagnetische methoden	27
5.4.1 Grondradar (GPR)	27
5.4.2 Elektromagnetische metingen	29
5.5 Magnetische methode	31
5.6 Micro-zwaartekracht methode	34
5.7 Boorgatmeten	36
5.8 Speciale conussen	37
6 Woordenlijst	40
7 Referenties	42
 Bijlage(n)	
A Bijlage: Tabel met geotechnische risico's en geofysische technieken	A-1

Aansprakelijkheid

© Stichting Deltares 2014, alle rechten voorbehouden. Geo-Impuls (www.geoimpuls.org) is het Nederlandse nationale werkprogramma gericht op het terugdringen van geotechnisch falen, waarin zo'n 40 private en publieke partijen uit de grond-, weg-, en waterbouwsector intensief samenwerken aan hulpmiddelen waarmee bouwprojecten volgens planning en binnen budget gerealiseerd kunnen worden. Geo-Impuls heeft geen rechtspersoonlijkheid en staat niet geregistreerd bij de Kamer van Koophandel. Stichting Deltares (www.deltares.nl) fungeert als Programmabureau van Geo-Impuls.

Als onderdeel van het werkprogramma van Geo-Impuls heeft Stichting Deltares, in samenwerking met diverse andere deelnemende partijen van Geo-Impuls, deze publicatie "*Geofysische methoden voor geotechnische ingenieurs*" samengesteld. Geo-Impuls en degenen die aan deze publicatie hebben meegewerkt hebben een zo groot mogelijke zorgvuldigheid betracht bij het samen- en opstellen van deze uitgave. Deze uitgave is gevoed en gecontroleerd door de Werkgroep en het Kernteam van Geo-Impuls. Nochtans moet de mogelijkheid niet worden uitgesloten dat deze uitgave, of de externe informatiebronnen (websites) van publieke en private partijen waarnaar in deze uitgave wordt verwezen, fouten en/of onvolledigheden bevatten.

Ieder gebruik van deze uitgave, alsmede de gegevens daarin en in de verwijzingen naar externe informatiebronnen daarin, is geheel voor eigen risico van de gebruiker. Geo-Impuls en haar deelnemers sluiten, mede namens ten behoeve van al degenen die aan deze uitgave hebben meegewerkt, iedere aansprakelijkheid uit voor schade, verliezen en andere nadelige effecten die mochten voortvloeien uit het gebruik van deze uitgave en de daarin opgenomen gegevens, tenzij in rechte kan worden vastgesteld dat dergelijke schades, verliezen en effecten het directe gevolg zijn van opzet of grove schuld aan de zijde van Geo-Impuls en/of degenen die aan deze uitgave hebben meegewerkt.

1 Inleiding

Geofysische methoden kunnen een kosteneffectieve aanvulling vormen op conventioneel geotechnisch grondonderzoek met boringen en sonderingen. De Geo-Impuls / CUR Richtlijn C247 'Risico gestuurd grondonderzoek' [1] geeft richtlijnen voor conventioneel geotechnisch grondonderzoek. Deze handleiding vormt een aanvulling op de CUR richtlijn.

De doelgroep van deze handleiding bestaat uit geotechnisch ingenieurs die de aard en omvang van het grondonderzoek specificeren, en grondonderzoek uitvragen aan grondonderzoeksbedrijven. Ook hun opdrachtgevers kunnen deze handleiding gebruiken.

Met deze handleiding kunnen geotechnisch ingenieurs:

1. Miscommunicatie voorkómen tussen geotechnisch ingenieurs en aanbieders van geofysische metingen.
2. Bepalen wanneer en welke geofysische methoden meerwaarde hebben als onderzoeksmethode voor specifieke geotechnische vragen;
3. Achtergrondinformatie krijgen over geofysische onderzoeksmethoden: meetprincipe, aanvullend parameters, toepassingsgebied, mogelijkheden, beperkingen, resolutie, dieptebereik, veelvoorkomende storingsbronnen en voorbeelden;

Deze handleiding bevat hiervoor de volgende hulpmiddelen:

1. Checklist met informatie vooraf te verstrekken door geotechnisch ingenieur, en wijze van rapporteren van de resultaten van de metingen → hoofdstuk [3](#);
2. Keuzehulpmiddel geofysische methoden → hoofdstuk [4](#) en bijlage [A](#);
3. Informatiebladen geofysische methoden → hoofdstuk [5](#).

De handleiding is van toepassing op geotechnische constructies in Nederland, op land en in rivieren en kanalen. Dit zijn dezelfde geotechnische constructies die in CUR C247 zijn opgenomen: bouwrijp maken, lijninfrastructuur, kleine kunstwerken, bruggen en viaducten, overlaten, sluizen, tunnels en aquaducten, polderconstructies, bouwputten, baggerwerken, steigers, kademuuren en leidingen. In aanvulling daarop komen afvalstorten, constructies op en in Zuid-Limburgse kalksteen en lekkage uit kanalen en boezems aan bod. De handleiding gaat niet in op waterkeringen; hiervoor wordt verwezen naar het Technisch Rapport Grondmechanisch Schematiseren bij Dijken van ENW [2]. Ook gaat de handleiding niet specifiek in op toepassingen voor milieuhygiënisch onderzoek.

De handleiding bevat specialistische terminologie. Een verklarende woordenlijst is opgenomen in hoofdstuk [6](#).

2 Achtergrondinformatie

De ondergrond in Nederland is door zijn ontstaansgeschiedenis heterogeen. Met boringen en sonderingen is deze ruimtelijke variabiliteit maar beperkt te vangen, omdat het puntmetingen zijn en daarmee slechts één-dimensionale (1D) karakterisering geven. De kracht van geofysica is dat hiermee lijndekkend of vlakdekkend (2D en 3D) inzicht kan worden verkregen in de heterogeniteit op de onderzoekslocatie. In vergelijking met conventioneel grond onderzoek (boringen en sonderingen), geven geofysische methoden een continu beeld van de ondergrond, en zijn in potentie meer geschikt voor de bepaling van heterogeniteiten in de grond (bijvoorbeeld holten, uitwiggende lagen, zandlenzen, breuken, bodemverontreiniging, etc). De kans om deze heterogeniteiten te vinden met conventionele methoden is kleiner, door het discontinue karakter van dit soort onderzoek [3, 4].

De grootste voordelen van geofysische methoden ten opzichte van traditionele technieken zijn [5, 4, 6]:

- Snelle uitvoering;
- Gebiedsdekkend;
- Goede ruimtelijke resolutie;
- De grond wordt niet verstoord bij geofysica vanaf de oppervlakte. De grond wordt niet extra verstoord vanuit een boorgat of CPT met speciale conus;
- Drie dimensionale verkenning over een groot volume in plaats van lokale (1D) bemonstering van kleine omvang;
- Herhaalbaarheid in de tijd;
- Waarnemen van laterale en verticale heterogeniteit;
- Mogelijkheid voor de kwantitatieve bepaling van de elastische parameters (bij kleine vervormingen).

De resultaten van het geofysisch onderzoek kunnen gebruikt worden om bijvoorbeeld de locatie van aanvullende boringen, sonderingen en monsternamapunten voor laboratoriumproeven te optimaliseren.

Om het succes van de inzet van geofysica te vergroten is het raadzaam om een combinatie van technieken toe te passen en het geofysische en geotechnische onderzoek te integreren (zie hoofdstuk [3.1](#)). Indien de locatie verontreinigd is, kan het onderzoek ook gecombineerd worden met het milieuhygiënisch onderzoek. Indien archeologisch onderzoek ook noodzakelijk is, kan dit ook geïntegreerd worden.

Hoewel geofysische methoden beschikbaar zijn voor geotechnisch ingenieurs, worden ze niet vaak gebruikt. Volgens een aantal bronnen [5, 6] komt het beperkt gebruik van geofysica door:

- Onbekendheid van de geotechnische ingenieur met de mogelijkheden van geofysische methoden;
- De miscommunicatie tussen de geotechnische ingenieur en de geofysicus, die informatie levert die de ingenieur niet verwacht. Teleurstellende resultaten, omdat de verkeerde technieken worden toegepast.
- Tegenvallende kosten ten opzichte van de bruikbaarheid van het resultaat.

Daarom het is belangrijk dat vanaf het begin, bij de planning fase, de geotechnische ingenieur en de geofysicus samenwerken in het opzetten van het grondonderzoek.

De meeste geofysische methoden meten geen geotechnische grondeigenschappen, maar verschillen in fysische eigenschappen van de grond. Deze moeten vertaald worden in parameters die de ingenieurs kunnen gebruiken voor het geotechnisch ontwerp. Bovendien levert geofysisch onderzoek soms geen unieke oplossing (equivalentie). Dit betekent dat er verschillende theoretisch ondergrondmodellen zijn die de gemeten geofysische resultaten kunnen verklaren [7]. Om te bepalen welk ondergrondmodel het beste is, is extra informatie nodig, bijvoorbeeld uit boringen of sonderingen. Dit benadrukt het belang van de samenwerking tussen de geotechnische ingenieur en geofysicus. Geofysische methoden zijn geen vervanging van conventioneel grondonderzoek, maar werken het best als aanvulling in een goed gepland en kosteneffectief grondonderzoek. Het uiteindelijk resultaat is een continu driedimensionaal beeld van de ondergrond in plaats van een lokale één-dimensionale grondkarakterisering [4, 3, 8].

3 Opzet van geofysisch onderzoek

Dit hoofdstuk beschrijft de plaats van geofysisch onderzoek in de gehele keten van projectfasering. Tevens geeft het een overzicht van de algemene opbouw van geofysisch onderzoek. Deze bestaat uit de onderzoeksstrategie, doelstellingen, onderzoeksspecificatie, uitvoering en rapportage.

3.1 Onderzoeksstrategie

Elk goed uitgevoerd onderzoek begint met een strategie. Volgens het principe van de GeoRM methode voor geotechnische risicomanagement [9] dient het grondonderzoek risicogestuurd opgezet. De CUR Richtlijn 247 Risicogestuurd grondonderzoek [1] geeft hiervoor aanwijzingen.

De CUR 247 Richtlijn geeft aanwijzingen voor risicobronnen, geotechnische mechanismen, te bepalen geotechnische parameters en traditioneel grondonderzoek voor een aantal grondgerelateerde constructietypen. De CUR 247 Richtlijn behandelt alleen de meest voorkomende risicobronnen en het bijbehorende grondonderzoek. Voor specifieke projecten kunnen andere risicobronnen belangrijk zijn; hiervoor geeft de Richtlijn geen concrete aanwijzingen voor grondonderzoek.

Volgens de CUR 247 er zijn 7 fasen in een project ([Figuur 1](#)). Geotechniek komt in eerste instantie aan de orde in de schetsontwerp fase, waar de geotechnische ingenieur gebruik maakt van globale ondergrond informatie. Het is in Nederland gebruikelijk om deze informatie te ontleen aan DINOloket, archieven, of eerdere ervaringen ter plaatse. De Geo-Impuls handleiding voor het opstellen van een geotechnisch ondergrondmodel [10] geeft hiervoor nadere aanwijzingen. Het doel van de schetsontwerp fase is een globaal identificatie van geotechnische risico's, en een globaal ondergrondmodel op te stellen voor verkennende ontwerpberekeningen.

In de voorontwerp fase kan het grondonderzoek bestaan uit een combinatie van conventionele geotechnische methoden en geofysische methoden. Het doel van de voorontwerp fase is de volledige identificatie van geotechnische risico's en de kritieke locaties waar deze risico's kunnen optreden, en het globale ondergrondmodel te verbeteren voor berekeningen aan het voorontwerp.

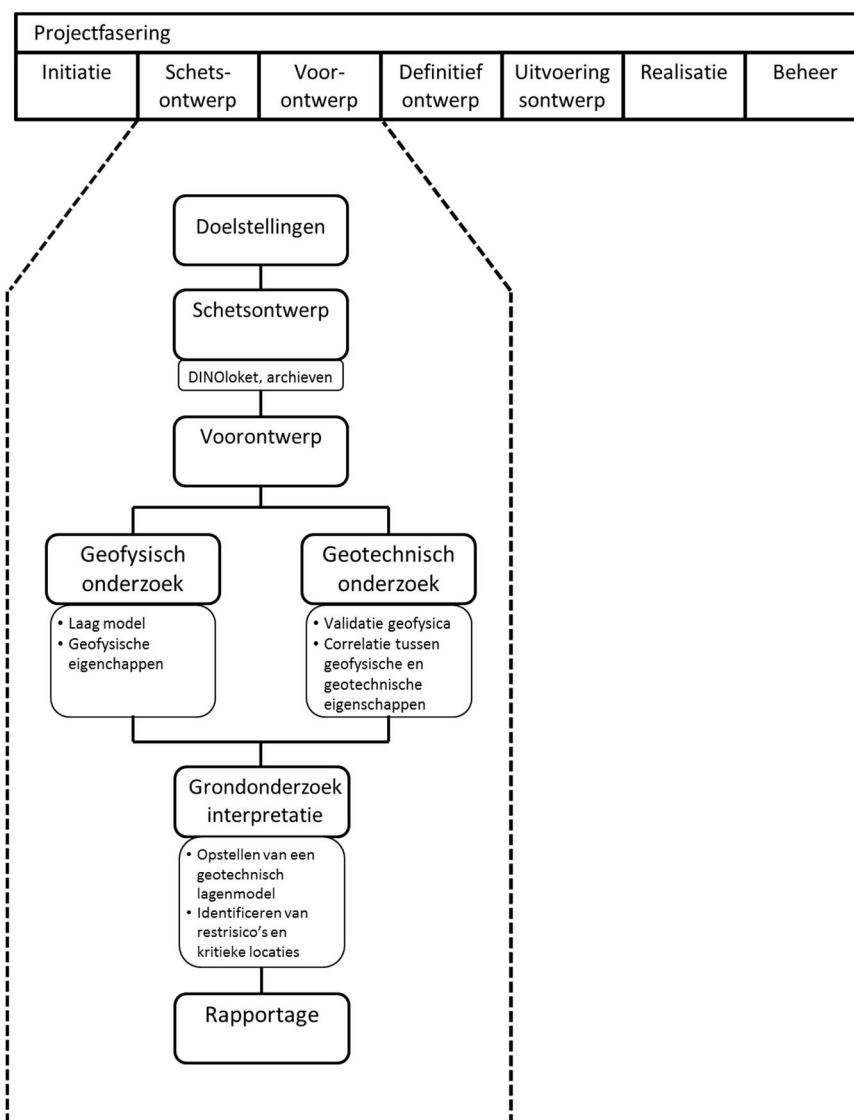
De CUR 247 geeft 6 vragen die beantwoord moeten worden bij iedere fase van een grondonderzoek:

1. Welk type grondgerelateerde constructie speelt in het project?
2. Wat zijn de belangrijkste risicobronnen en wat zijn de gevolgen voor het project?
3. Wat zijn de geotechnische mechanismen?
4. Welke ontwerp- en uitvoeringsmethodieken beschrijven het mechanisme?
5. Welke geotechnische parameters en kenmerken van de laagopbouw zijn van belang?
6. Welk grondonderzoek en monitoring zijn nodig om parameters en laagopbouw te bepalen?

Inzet van geofysische methoden komt aan de orde bij de beantwoording van vraag 6 bij het schetsontwerp, en bij vragen 2-6 bij het voorontwerp.

De mate van succes van het geofysisch onderzoek hangt sterk af van de locatie-specifieke omstandigheden. Het is in het belang van het onderzoek dat eerdere ervaringen met die

geofysische techniek op die grondsoort in de afweging worden meegenomen. Als deze ervaring niet bestaat is het raadzaam om proeven te doen (signaaltest), om de slaagkans van het geofysisch grondonderzoek te optimaliseren.



Figuur 1 – Schema voor inzet van geofysisch grondonderzoek in de voorontwerp fase (uit [1] aangepast).

3.2 Doelstellingen

De doelstelling van het geofysisch onderzoek moet vanaf het begin duidelijk zijn. Bijlage [A](#) geeft aan welke doelstellingen volgen uit de geotechnische risico's voor bepaalde geotechnische constructies. Voor geofysisch grondonderzoek liggen de doelen vooral op het gebied van:

- Laagindeling - laterale variabiliteit en continuïteit;
- Laagindeling - verticale profilering;
- Grondclassificatie;
- Locatie van objecten: kabels en leidingen, funderingsresten, puin, archeologische resten, onontpofte explosieven;
- Bepaling van de elastische parameters bij kleine vervorming;
- Bepaling van porositeit, permeabiliteit.

3.3 Onderzoeksspecificatie

Voor zowel het geotechnische onderzoek als voor het geofysische onderzoek is achtergrondinformatie onontbeerlijk. Om te kunnen bepalen of en welke geofysische technieken ingezet kunnen worden kan de checklist uit [Tabel 1](#) gebruikt worden.

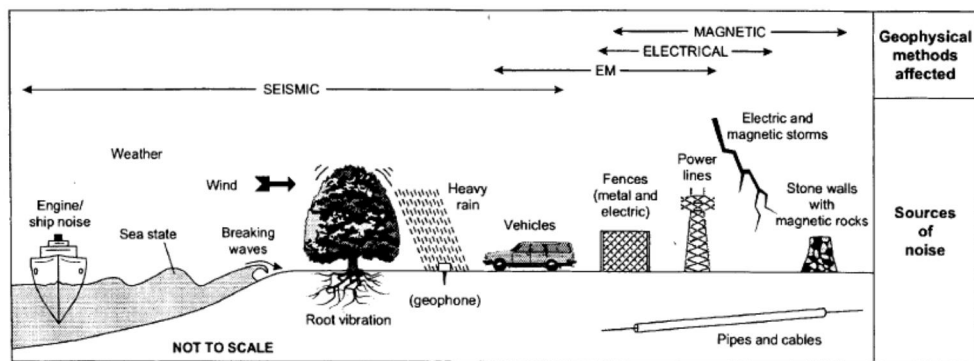
Tabel 1 – Checklist achtergrondinformatie nodig voor geofysisch onderzoek.

Gerelateerd aan	Onderdeel
Locatie	Tekeningen huidige en toekomstige situatie
	Toegankelijkheid van het terrein
	Historische gegevens van de locatie
	Informatie over storingsbronnen
	Topografie en morfologie van de locatie
	Aanwezigheid van peilbuizen
	Mogelijke aanwezigheid van verontreinigingen
	Mogelijke aanwezigheid van archeologische resten
	Aanwezigheid van ondiep gas of hydraten (relevant bij waterbodems)
Grond	Informatie uit bestaande boringen en sonderingen
	Eerste interpretatie van een geotechnisch lagenmodel mogelijk met bijbehorende grondeigenschappen
	GeoTOP profielen
	Doelstelling van het onderzoek in termen van geotechnische parameters, gerelateerd aan geotechnische risico's
	Benodigde onderzoeksdiepte en nauwkeurigheid
	Grondwaterstanden en zoutgehalte / geleidbaarheid van het grondwater
Constructie	Type geotechnische constructie
	Representatieve lengte- en dwarsprofielen van de huidige en toekomstige situatie
	Lijst van relevante geotechnische risico's, op basis van CUR Richtlijn 247 en bijlage A van deze handleiding

Informatie uit het vooronderzoek dat in het geotechnische kader uitgevoerd wordt, kan veelal dienen als achtergrondinformatie voor het geofysische onderzoek. Het vooronderzoek kan bijvoorbeeld bestaan uit het bestuderen van gegevens uit DINOLoket, geologische kaarten, archieven, luchtfoto's en een bezoek aan de projectlocatie. Als het project een groot gebied betreft, en er weinig informatie over de locatie bestaat, is het van belang dat een globaal vooronderzoek wordt uitgevoerd om te zorgen dat de gekozen geofysische technieken haalbaar zijn en de verwachte resultaten zullen opleveren, afhankelijk van de lokale grondkarakteristieken. Ook is het van groot belang de lokale geologische en geotechnische omstandigheden te communiceren met de geofysisch adviseur. Juist aan de hand hiervan zal de geofysisch adviseur een bepaalde methode adviseren of ontraden.

Sommige geofysische methoden zijn gevoelig voor storingen. Er zijn verschillende bronnen van storing. Er zijn antropogene bronnen (elektrische kabels, voertuigen, leidingen, riolering) en natuurlijke bronnen (wind, regen, golven, elektrische en magnetische stormen). Afhankelijk van de soort geofysische methode, is er een kans dat de resultaten van het onderzoek worden verstoord. [Figuur 2](#) geeft een beeld van de verschillende storingsbronnen en hun effect op de verschillende geofysische methoden. Seismische methoden zijn gevoelig voor natuurlijke en antropogene storingsbronnen, terwijl elektrische en magnetische methoden vooral gevoelig zijn voor antropogene bronnen. Indien de ruisbronnen bekend zijn, is er in de

bewerking van de data vaak voor te corrigeren of is de signaal-ruis verhouding te verbeteren door filtering. Over het algemeen is er meer ruis in de bebouwde omgeving ten opzichte van landelijk gebied. Voor de juiste inschatting van de hoeveelheid storing en ruis en of dat overkomelijk is dient per situatie een geofysicus geraadpleegd te worden.



Figuur 2 – Storingsbronnen voor geofysische methoden (uit [3]).

3.4 Uitvoering en rapportage

Na afstemming van het geofysische onderzoek (welke methode, waar en wanneer uit te voeren), wordt het geofysisch onderzoek uitgevoerd. Dit zal over het algemeen worden gedaan door een specialistisch bedrijf of kennisinstelling. Het heeft de voorkeur de uitvoering te combineren met het geotechnische onderzoek. Goede communicatie en afstemming hierover is nodig, bijvoorbeeld over de locatie van de benodigde boringen en/of sonderingen die dienen voor de validatie. Bovendien zouden geotechnische activiteiten sommige geofysische metingen kunnen storen.

Over het algemeen dienen de ruwe geofysische data bewerkt te worden alvorens ze geïnterpreteerd en gevalideerd kunnen worden. Bij de interpretatie en validatie is terugkoppeling tussen de geofysicus en de geotechnisch ingenieur nodig, in een iteratief proces. De resultaten worden gevat in een rapport. Dit kan een op zichzelf staand geofysisch rapport zijn of een geïntegreerd geotechnisch/geofysisch rapport. Zoals elk rapport dient het onderdelen te bevatten als doelstelling en motivatie, aanpak, resultaten, interpretatie, conclusies en aanbevelingen.

Om de bruikbaarheid van het geofysisch onderzoek voor de geotechnisch ingenieur te waarborgen, wordt aangeraden vroegtijdig overleg te laten plaatsvinden over de voorlopige resultaten. Dit kan aan de hand van het schema in [Tabel 2](#).

Tabel 2 – Fasen in de rapportage van geofysisch onderzoek of gecombineerd geofysisch/geotechnisch onderzoek.

Onderdeel	Verantwoordelijkheid
Opstellen van het concept rapport over het geofysisch onderzoek	Geofysicus
Opstellen van het concept rapport over het geotechnisch onderzoek	Geotechnisch ingenieur
Discussie over het concept rapport over het geofysisch onderzoek met de koppeling tussen geofysisch en geotechnisch model	Geofysicus en geotechnisch ingenieur
Opstellen van het definitief rapport over het geofysisch onderzoek met hoofdstuk over de koppeling tussen geofysisch en geotechnisch model	Geofysicus
Of: integratie van de concept rapporten over het geofysisch en geotechnisch onderzoek tot het definitief integraal rapport, met een hoofdstuk over de koppeling tussen het geofysisch en het geotechnisch model	Geofysicus en geotechnisch ingenieur

4 Selectie van geschikte geofysische methoden

De CUR Richtlijn 247 Risico gestuurd grondonderzoek [1] geeft voor verschillende geotechnische constructies de risico's, oorzaak en het benodigde grondonderzoek. Bij verschillende risico's kan geofysica een nuttige bijdrage leveren, aanvullend op boringen en sonderingen. In bijlage A is een tabel opgenomen waarin de geotechnische risico's uit CUR Richtlijn 247 gekoppeld zijn aan geofysische technieken die voor deze toepassing nuttig kunnen zijn. Vanwege de grootte van de tabel is deze opgenomen in een bijlage; de tabel is ook beschikbaar als Excel spreadsheet. In deze tabel zijn de risico's, oorzaken en geschikte onderzoeksmethoden gegroepeerd. De tabel is aangevuld met de overzichtstabel met geofysische technieken en geotechnische toepassingen uit de Amerikaanse Geophysical "Methods Commonly Employed for Geotechnical Site Characterization" [11].

De risico's in bijlage A zijn te onderscheiden in:

- Risico's waarvoor ook met andere methoden voldoende informatie kan worden ingewonnen, zoals het GeoTOP model via DINOLoket, beperkt conventioneel grondonderzoek. Hierbij kan – afhankelijk van de vraagstelling – geofysica overwogen worden;
- Risico's waarvoor de inzet van geofysische methoden sterk aanbevolen wordt. Indien afgezien wordt van de geofysica, dient hiervoor een goede argumentatie aangedragen te worden.

De risico's waarvoor de inzet van geofysische methoden serieus dient te worden overwogen zijn samengevat in Tabel 3. Slechts bij gegronde redenen kan afgezien worden van geofysisch onderzoek, bij voorkeur in overleg met een geofysicus. De risico's waarbij de inzet van geofysica sterk wordt aanbevolen zijn risico's waarbij:

- De afmetingen van de ondergrondfenomenen die het risico veroorzaken kleiner zijn dan ca. 100 m, zijnde de gemiddelde afstand tussen onderzoekspunten in het geotechnisch onderzoek, c.q. de resolutie van het GeoTOP model van DINOLoket;
- Onderzoek op water nodig is; vanwege de kosten van conventioneel grondonderzoek op water moeten de onderzoekslocaties met zorg worden gekozen. Praktisch is geofysisch onderzoek op water efficiënter uit te voeren dan conventioneel grondonderzoek op water;
- Onderzoek over grote lengten of gebieden nodig is;
- Destructief onderzoek gevaar oplevert, zoals bij onderzoek van verontreinigde locaties.

Een andere reden om geofysische methoden in te zetten kan zijn de slechte toegankelijkheid van de site voor materieel voor traditioneel grondonderzoek, bijvoorbeeld vanwege dichte begroeiing. Voor geofysisch onderzoek moet de site wel toegankelijk zijn, maar over het algemeen voor kleiner en lichter materiaal.

De kosten van een geofysisch onderzoek zijn sterk afhankelijk van de gebruikte techniek, planning, acquisitie, processing en interpretatie. Het is niet mogelijk om per techniek aan te geven wat de inzet ervan kost, omdat geofysische onderzoek maatwerk is. De te beantwoorden vraag, de locatie en de randvoorwaarden bepalen in sterke mate welke technieken succesvol ingezet kunnen worden. Of de inzet van geofysica kosten-efficiënt is, hangt af van de kosten én van de bruikbaarheid van het resultaat. Dit is waarschijnlijk het

geval voor de situaties zoals beschreven in Tabel 3. Een geofysisch expert moet echter per situatie geraadpleegd worden om een schatting te verkrijgen van de kosten.

Naast het overzicht dat in deze handleiding is gegeven, zijn er diverse tools beschikbaar om te bepalen welke geofysische methode het beste ingezet kan worden (bijv. Geopass, [12]). Op internet zijn diverse tools te vinden, zoals bijvoorbeeld de Engelstalige tool die ontwikkeld is door de U.S. Environmental Protection Agency (EPA) [13].

Tabel 3 – Risico's waarvoor inzet van geofysische methoden sterk wordt aanbevolen.

Risico	Oorzaak
Bemalingsdebiet te hoog	Aanwezigheid van lokale zandlagen, onvoldoende bekend
Onderloopsheid, achterloopsheid, piping	
Opbarsten bouwput	Afdichtende lagen onvoldoende bekend
Kleilaag te ondiep, waterdichtheid van kleilaag onvoldoende	Laagindeling anders dan geschematiseerd
Onder water ontgroning	
Waterdruk onder folie te hoog	
Baggerwerken: kwaliteit en/of hoeveelheid materiaal wingebied minder dan verwacht	
Onvoldoende rekening gehouden met ontgroning (onder water)	
Stabiliteitsverlies (talud, kade, grondkerende constructie)	Laagindeling anders dan geschematiseerd en sterkte overschat Kalksteen en mergel Lekkage uit kanalen en boezems
Verschilzetting verkeerd ingeschat	Lithologie (grondsoort) en stijfheid contrasten in de ondergrond
Verschilzetting verkeerd ingeschat bij wegverbredingen	
Drooglegging onvoldoende	Grondwaterstand te hoog
Omgevingsbeïnvloeding; deformaties van kabels, leiding, rioleringen, obstakels, holtes	Onvoldoende informatie over aanwezigheid kabels en leiding
Risico's gerelateerd aan stortplaatsen	Heterogeniteit stortplaats onvoldoende bekend
Risico's gerelateerd aan kalksteen (Zuid-Limburg)	Laagindeling anders dan geschematiseerd en holtes
Aanwezigheid van archeologie	Onvoldoende archeologie studie

5 Geofysische methoden

5.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft de geofysische methoden die vaak in Nederland worden toegepast. Geofysische methoden zijn en worden met succes gebruikt voor het onderzoek naar de ondiepe en diepe ondergrond. Voorbeelden van het gebruik van geofysica voor de diepe ondergrond zijn het lokaliseren en karteren van olie- en gas reservoirs en ertslichamen. Ondiepe toepassingen van geofysica zijn bijvoorbeeld het lokaliseren van lekkages van dammen en dijken, het karteren en visualiseren van de ondergrond, het opsporen van gebreken in diepwanden, het bepalen van asfaltdiktes etc. Er zijn veel verschillende geofysische methoden beschikbaar met een keur aan toepassingen. Iedere methode heeft zijn eigen meetprincipe, configuratie, resolutie, dieptebereik, toepassingen en beperkingen.

Welke geofysische techniek of combinatie van technieken het beste ingezet kan worden hangt af van de vraagstelling, de gewenste resolutie en diepte en het beschikbare budget. Hierop wordt dieper ingegaan in hoofdstuk 3.

Over het algemeen bestaat geofysisch onderzoek uit zeven fasen:

- 1 Vaststelling van de vraagstelling. Dit onderdeel kan gecombineerd worden met andere typen onderzoek (geotechnisch, archeologisch, milieuhygiënisch, etc). Zie ook de checklist uit [Tabel 1](#).
- 2 Historisch onderzoek: het verzamelen van al bestaande gegevens (indien beschikbaar). Ook dit onderdeel kan gecombineerd worden met ander onderzoek. Zie ook de checklist uit [Tabel 1](#).
- 3 Selectie van de meetmethoden. Hierbij dient rekening gehouden te worden met de omgeving (bijvoorbeeld bebouwd gebied) en de vraagstelling in relatie tot verwachte ruis en storingsbronnen. Indien nodig: inclusief een signaaltest op een deel van de locatie.
- 4 Data-acquisitie: het verzamelen van meetgegevens in het veld.
- 5 Verwerking (processing): Kwaliteitscontrole, het verwijderen van data met slechte kwaliteit, verbeteren van de signaal- ruisverhouding.
- 6 Inversie: het afleiden van fysische parameters van de ondergrond op basis van de gemeten data, met behulp van speciale software/algoritmen. Het maken van een ondergrond model.
- 7 Interpretatie: transformatie van fysische parameters naar geologische/geotechnische informatie. Fundamenteel is de integratie met a priori informatie, zoals boringen en sonderingen, laboratorium testen en/of alternatieve geofysische methoden.

Het succes van het geofysisch onderzoek wordt bepaald door een combinatie van ervaring, de juiste combinatie van technieken en samenhang tussen verschillende informatiebronnen (historisch, boringen sonderingen, geofysisch en geotechnisch).

Alle geofysische methoden zijn gebaseerd op het detecteren van contrasten in bepaalde fysische eigenschappen van de ondergrond. Wanneer het contrast te klein is, bijvoorbeeld bij een geleidelijke overgang in seismische snelheid, dan kan het fysisch contrast te klein zijn om te detecteren. Voor geotechnische vraagstellingen is bijvoorbeeld het onderscheid tussen klei en veen belangrijk. Deze grondsoorten geven bij verschillende geofysische methoden grotere of kleinere contrasten. Omdat contrasten niet altijd gerelateerd zijn aan verschillen in

grondsoort, maar ook aan bijv. poriewater dient de relatie met de grondsoort altijd geverifieerd te worden met behulp van een aantal boringen en sonderingen.

Bovendien dient de methode te zijn afgestemd op het verwachte fysische contrast. Zo is een gravimeter die dichtheidscontrasten kan meten niet gevoelig voor een contrast in elektrische geleidbaarheid.

De belangrijkste beperking van geofysica is het equivalentie probleem. Bij inversie kunnen de geofysische metingen zonder aanvullende data vaak met meerdere ondergrondmodellen verklaard worden. Met behulp van achtergrondinformatie, zoals boringen, informatie over grondwaterstand en –kwaliteit, kan het aantal waarschijnlijk correcte modellen teruggebracht worden. Niet alle geofysische methoden hebben te maken met equivalentie. Wanneer er sprake is van equivalentie is dit bij een geofysische methode vermeld onder het kopje 'Beperkingen en ruis'.

Al hoewel er veel geofysische technieken en toepassingen zijn, worden in de volgende secties alleen methoden beschreven die relevant zijn voor geotechnische doeleinden. Zo worden bijvoorbeeld Time domain ElectroMagnetics (TEM) en Nuclear Magnetic Resonance (NMR) niet beschreven. Geofysische technieken kunnen worden ingezet vanaf de oppervlakte, vanuit een boorgat, vanuit een satelliet of met een speciale sondeerconus. Aardobservatie technieken (vanuit een satelliet, helikopter etc) zijn niet in dit overzicht opgenomen.

Dit hoofdstuk bevat uitleg over de volgende geofysische methoden:

1. Seismische (§ 5.2);
2. Elektrische (§ 5.3);
3. Elektromagnetische (§ 5.4);
4. Magnetische (§ 5.5);
5. Zwaartekracht (§ 5.6);
6. Boorgatmethoden (§ 5.7);
7. Speciale conussen (§ 5.8).

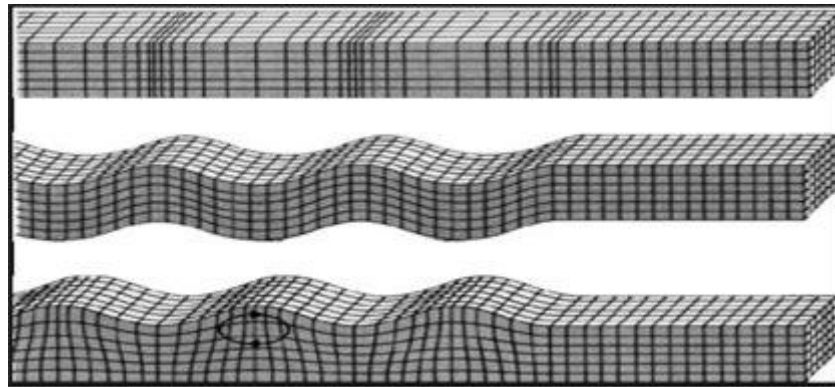
Voor elke methode wordt een korte uitleg gegeven over het meetprincipe, de toepassingen, de resolutie en dieptebereik, de beperkingen en ruisbronnen. Als illustratie van de techniek wordt een voorbeeld gegeven. Resolutie is het scheidende vermogen. Hiervoor worden slechts vuistregels gegeven. De resolutie hangt af van de ondergrond en van de keuzes die gemaakt worden bij de dataverzameling, bijvoorbeeld van de gebruikte bron en van de configuratie van de ontvanger(s).

5.2 Seismische methoden

5.2.1 Algemene beschrijving seismiek

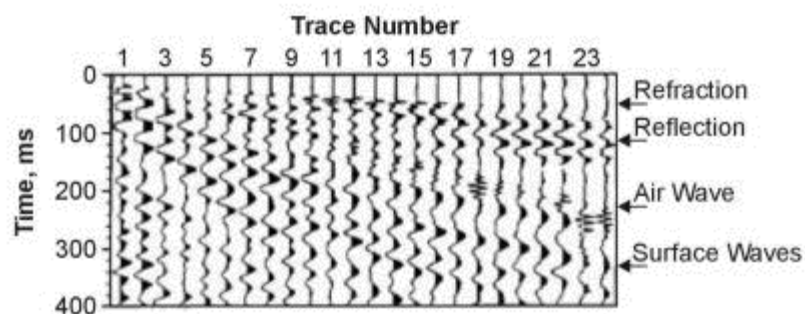
Een trilling in een medium, opgewekt door een seismische bron, plant zich in alle richtingen voort. De snelheid waarmee dit gebeurt, is afhankelijk van de akoestische eigenschappen van het medium. De voortplanting kan beschreven worden in verschillende typen golven [14] ([Figuur 3](#)). Door de ondergrond lopen ruimtegolven en langs de 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 3 – Grafische weergave van verschillende seismische golven: Boven: compressie golf. Midden: schuifgolf. Onder: oppervlaktegolf.

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 typen golven is weergegeven in [Figuur 4](#). 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 4 – Simpel seismogram met daarin de signalen van de verschillende golven. Horizontaal staan de registraties per gefoon weergegeven, verticaal de tijd. Uit [15].

5.2.2 Reflectie seismiek

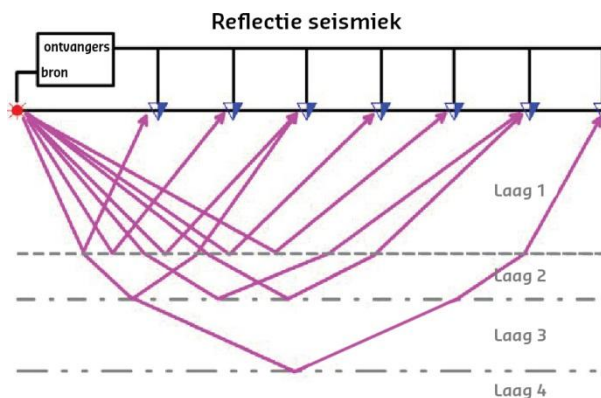
Principe

De seismische reflectie techniek is gebaseerd op het feit dat seismische energie bij een contrast in akoestische impedantie voor een deel gereflecteerd wordt [14]. Het andere deel van de energie gaat dieper de ondergrond in (transmissie) en reflecteert op een dieper impedantiecontrast. Dit principe is weergegeven in [Figuur 5](#). 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 5 – Het principe van reflectie seismiek. De roze lijnen geven de golfpaden in de ondergrond aan. Het bijbehorende signaal van een reflectie is weergegeven in [Figuur 4](#).

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 reflectieseismiek 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).

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 schuifgolreflectie 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.

Beperkingen en ruis

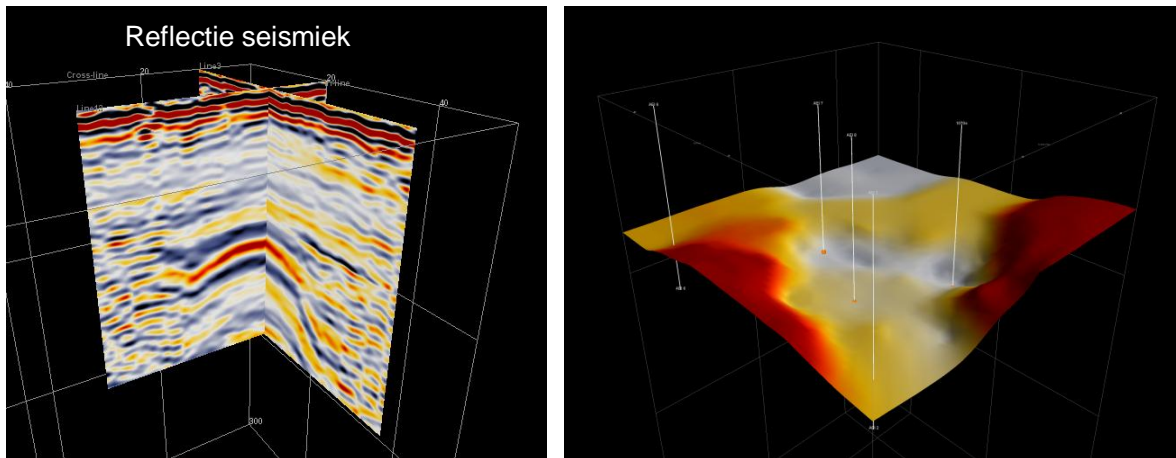
Equivalentie is niet van toepassing op reflectie seismiek. Er is geen inversie nodig voor het visualiseren van de reflecties in de ondergrond.

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 top laag 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 screenen. In de kustzone geven de golven in de zee een achtergrondruis. Schuifgolven zijn gevoeliger voor ruis dan compressiegolven.

Voorbeeld

In [Figuur 6](#) 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 6](#) 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 6 –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.

Een ander voorbeeld van de toepassing van verschillende soorten seismiek (ruimtegolven op water en schuifgolven en MASW op de kaden) in combinatie met grondradar wordt gegeven door het Geo-impuls pilot project op het Julianakanaal [16]. In deze specifieke toepassing bleken voor het inzicht in de grondopbouw onder en in kanaalkaden de seismische S-golf metingen en de grondradarmetingen het meest succesvol. Deze laten duidelijk gelaagdheden in en onder de dijk zien. Om obstakels in het kanaal te karteren leverde 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.

5.2.3 Refractie seismiek

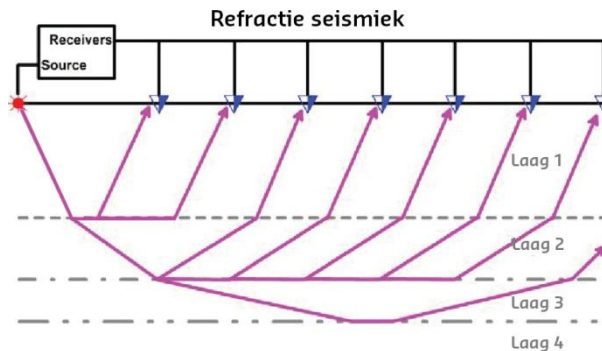
Principe

Wanneer de seismische golf onder een bepaalde hoek (de kritische hoek) aankomt bij een impedantie (laag)overgang, zal de golf langs deze overgang reizen (zie [Figuur 7](#)) [14]. De kritische hoek wordt bepaald door het snelheidscontrast tussen de lagen volgens de wet van Snellius:

$$\frac{\sin(\theta_1)}{\sin(\theta_2)} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \quad (2)$$

Met θ de hoek, v de golfsnelheid en λ de golflengte in medium 1 (subscript 1) en 2 (subscript 2). Bij de kritische invalhoek van $\theta_c = \theta_1 = \arcsin(v_1/v_2)$ is de brekingshoek θ_2 gelijk aan 90° . Dit betekent dat de golf langs het grensvlak breekt en niet in het 2^e medium terechtkomt. Na enige tijd langs het grensvlak gereisd te hebben, breekt de golf vervolgens weer omhoog en het signaal wordt opgevangen door geofoons. Dit verschijnsel treedt alleen op als de snelheid van de diepere laag groter is dan de snelheid in de ondiepere laag. De ontvangers staan over het algemeen op een grotere afstand van de bron dan bij reflectie seismiek.

Dataverwerking van alle opnemers levert een globaal bodemprofiel met laagdikten en golfsnelheden van de ruimtegolven per laag.



Figuur 7 –Principe van refractie seismiek. De roze lijnen geven de golfpaden in de ondergrond aan. Het bijbehorende signaal van een refractie is weergegeven in [Figuur 4](#).

Toepassingen

Refractie seismiek wordt ingezet om de lagenstructuur van de ondergrond te bepalen, bijvoorbeeld van scheve gelaagdheid, oude mijnen, breuken en de grondwaterspiegel. Ook kunnen zwakke zones (schuifzones en breuken) geïdentificeerd worden. Uit de snelheden kunnen in situ eigenschappen van de ondergrond bepaald worden, zoals de compressie en de schuif modulus. Dit zijn stijfheidseigenschappen bij kleine vervormingen. Vervormingen in de geotechniek (bijna falen) liggen vaak in een ander bereik (niet elastisch).

Resolutie en dieptebereik

Over het algemeen wordt refractie bij geotechniek toegepast tot een diepte van enkele tientallen meters. Omdat refractie optreedt vanaf een bepaalde hoek, is er een grotere afstand nodig tot de eerste ontvanger dan bij reflectie seismiek. De locatie dient groot genoeg te zijn om alle geofoons te kunnen plaatsen. De verticale resolutie bedraagt 10 tot 20 % van de diepte. De horizontale resolutie wordt bepaald door de afstand tussen de geofoons en is ongeveer gelijk aan de helft van deze afstand.

Beperkingen en ruis

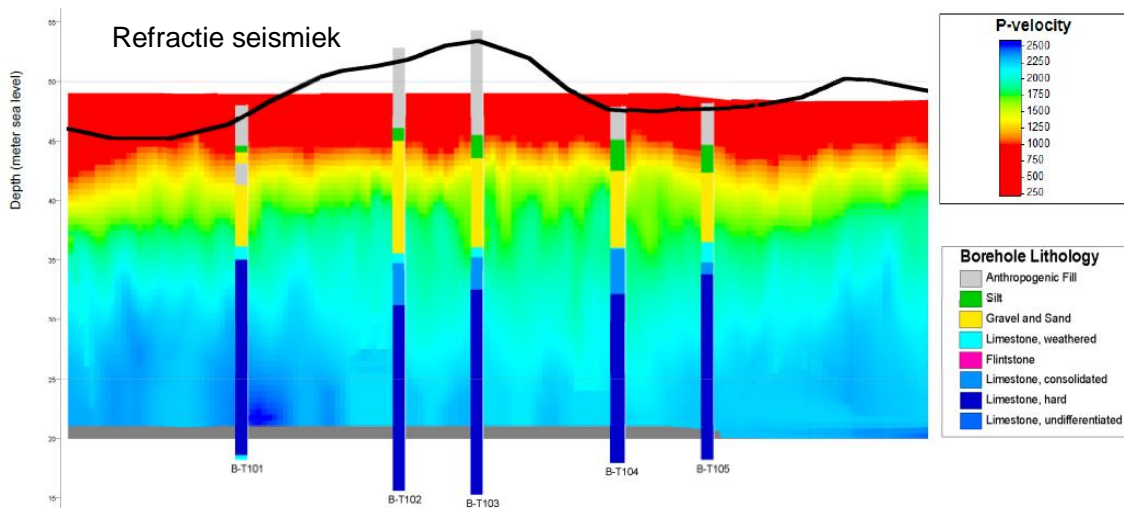
Refractie treedt alleen op bij snelheidstoename met de diepte. Wanneer de snelheid afneemt met de diepte, kan deze laag niet gedetecteerd worden met refractie. Dit is een zogenaamde "hidden layer". Ook dient het contrast in snelheid tussen de verschillende lagen groot genoeg te zijn. Subtiële overgangen zijn niet te detecteren.

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. Schuifgolven zijn gevoeliger voor ruis dan compressiegolven.

Voorbeeld

[Figuur 8](#) toont een voorbeeld van het resultaat van seismische refractie. Voor de aanleg van een de A2 tunnel in Maastricht was inzicht nodig in zwakke plekken in de ondergrond en de ligging van breuken. Deze informatie was relevant voor het maken van een veilig ontwerp voor de aanleg van de fundering van de wanden. Uit resultaten van refractie-seismiek is de snelheidsverdeling van de compressiegolf (V_p) afgeleid. In de figuur is een lateraal profiel te zien van deze snelheidsverdeling. Er zijn tevens vijf boringen met informatie over de

grondsoort weergegeven. De duidelijke overgangen in V_p komen overeen met verschillende grondsoorten (grind, kalksteen, etc.) uit de boringen. Er kan informatie worden ingewonnen over een dieptetraject van ongeveer 30 m. Met deze methode kunnen laterale variaties in geologische eenheden inzichtelijk gemaakt worden. Bovendien kan een inschatting gemaakt worden van mogelijke holtes en breuken.



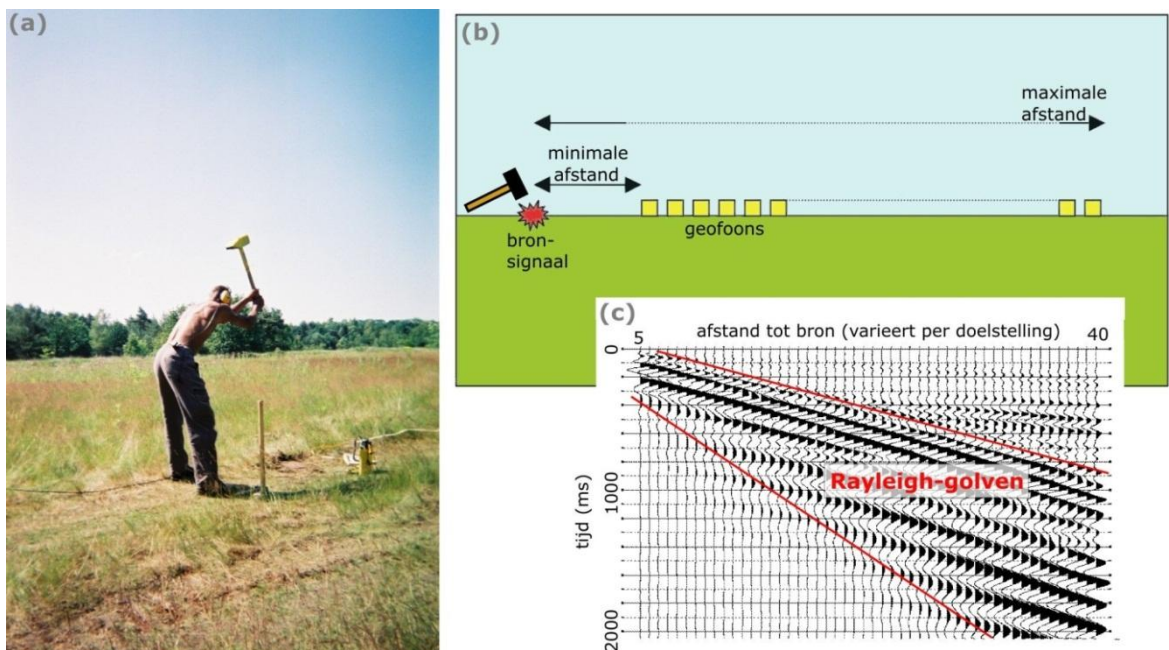
Figuur 8 – Voorbeeld van een resultaat van seismische refractie op een traject voor de aanleg van een tunnelconstructie. De kleurcodering geeft de verdeling van de compressiegolf snelheid (V_p) aan. In de figuur zijn tevens 5 boringen geplott met grondsoort weergegeven (zie legenda). Vooral de top van de grindlaag komt goed naar voren in de variaties in compressiegolfsnelheid V_p . Gegevens van Consortium Avenue 2, Maastricht.

5.2.4 Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW)

Principe

MASW maakt gebruik van oppervlaktegolven [17]. 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 9](#) 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 9 – 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.

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.

Resolutie en dieptebereik

Het dieptebereik van een oppervlaktegolf is ongeveer 1 golflengte door de sterke 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.

Beperkingen en ruis

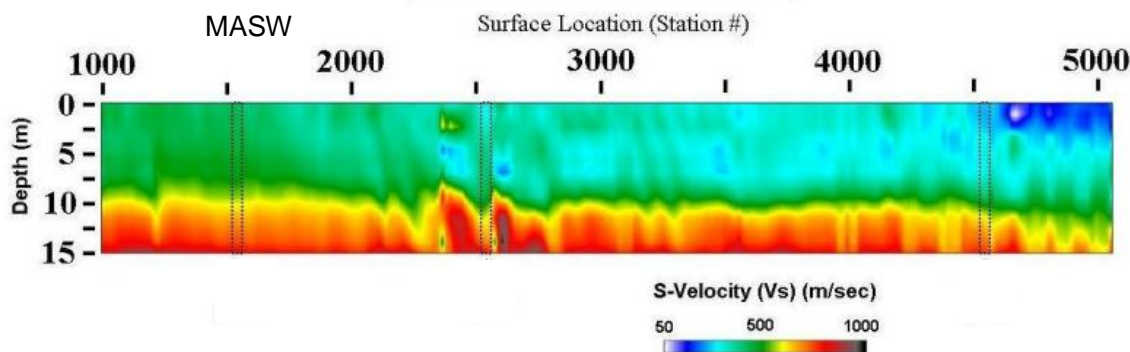
MASW geeft de gemiddelde laagopbouw van de bodem weer over de lengte van het ontvanger netwerk. Laterale verschillen die op kleine schaal optreden kunnen met deze methode niet gedetecteerd worden. Primair doel van MASW is niet het geven van laagopbouw, maar het afleiden van de schuifgolfsnelheid die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

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 10](#) is een voorbeeld te zien van het resultaat van een MASW studie [18]. 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.

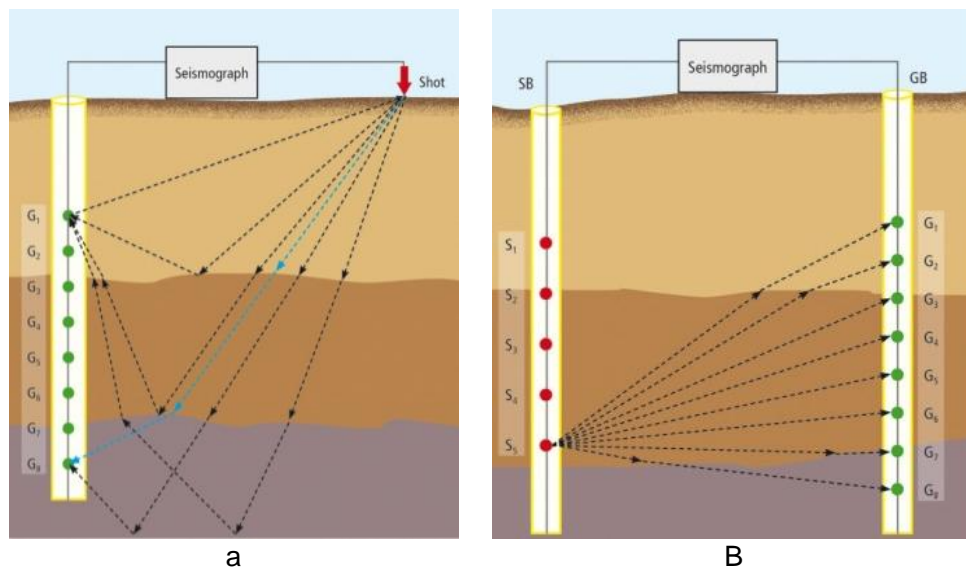


Figuur 10 – Voorbeeld van resultaat van MASW: laterale en verticale variatie in schuifgolfsnelheid ten behoeve van de plaatsing van een windturbine. Het profiel is ongeveer 60 m lang. Uit [18].

5.2.5 Cross-hole en downhole methoden

Cross-hole en down-hole maken gebruik van boringen die voor het grondonderzoek worden uitgevoerd. De achterliggende principes zijn gelijk als bij seismiek vanaf het maaiveld. Er wordt gebruik gemaakt van een speciale configuratie van de geofoons. In de down-hole methode ([Figuur 11a](#)) bevindt de bron zich aan het maaiveld en zijn de opnemers geplaatst in het boorgat of kan een VSP conus gebruikt worden. Bij de cross-hole methode worden twee boorgaten gebruikt: één voor de bron en één voor de ontvangers ([Figuur 11b](#)). Uit het looptijdverschil en de bekende afstand kan de compressiegolf en de schuifgolfsnelheid afgeleid worden. De cross-hole methode geeft meer laterale informatie over bodemlagen dan het down-hole, maar heeft twee boorgaten nodig in plaats van één. Cross-hole kan ook uitgevoerd worden met 1 boorgat en 1 VSP conus. Down-hole geeft meer informatie over de verticale gelaagdheid.

Over het algemeen is de resolutie van down-hole en cross-hole toepassing groter dan bij reflectie- en refractie seismiek, omdat de afstanden tussen de geofoons kleiner zijn, het storende effect van de verweerde toplaag kleiner is en minder demping van het signaal optreedt. Ook zijn er meer looppaden van de golven door het medium, waardoor meer informatie kan worden afgeleid uit het medium. Bij cross-hole is inversie nodig, waardoor het equivalentie probleem speelt.



Figuur 11 – Seismische methoden in down-hole configuratie (a) en in cross-hole configuratie (b). De rode pijl en punten geven schotlocaties weer. De geofoons bevinden zich op diepte (groene punten). Figuren copyright ASST.

5.3 Elektrische methoden

5.3.1 Elektrische weerstandsmethode (Electrical Resistivity Tomography, ERT)

Principe

Contrasten in elektrische weerstand in de ondergrond bestaan bijvoorbeeld tussen droge en watervoerende sedimenten, grondsoort, verweringsgraad en de samenstelling van het grondwater. Het patroon van elektrische weerstand in de ondergrond kan achterhaald worden met de elektrische weerstandsmethode (geo-elektriek of Electrical Resistivity Tomography, ERT). Met behulp van een opstelling van twee stroomelektroden en twee potentiaalelektroden, kan de elektrische weerstand in de grond gemeten worden ([Figuur 12](#)). De stroom- en potentiaal elektroden kunnen in verschillende configuraties geplaatst worden. Veelgebruikte configuraties zijn bijvoorbeeld Wenner, Schlumberger, of dipool-dipool. Naarmate de elektrodes verder uit elkaar staan, levert ERT informatie over steeds diepere lagen, afhankelijk van de elektrische kenmerken en opbouw van de ondergrond. Door het patroon en de afstand tussen de stroom- en potentiaalelektroden te variëren wordt informatie verzameld over de laterale verdeling van de weerstand en de verdeling in de diepte. Inversie van de alle gemeten weerstanden levert een profiel op van de werkelijke weerstandsverdeling met de diepte.

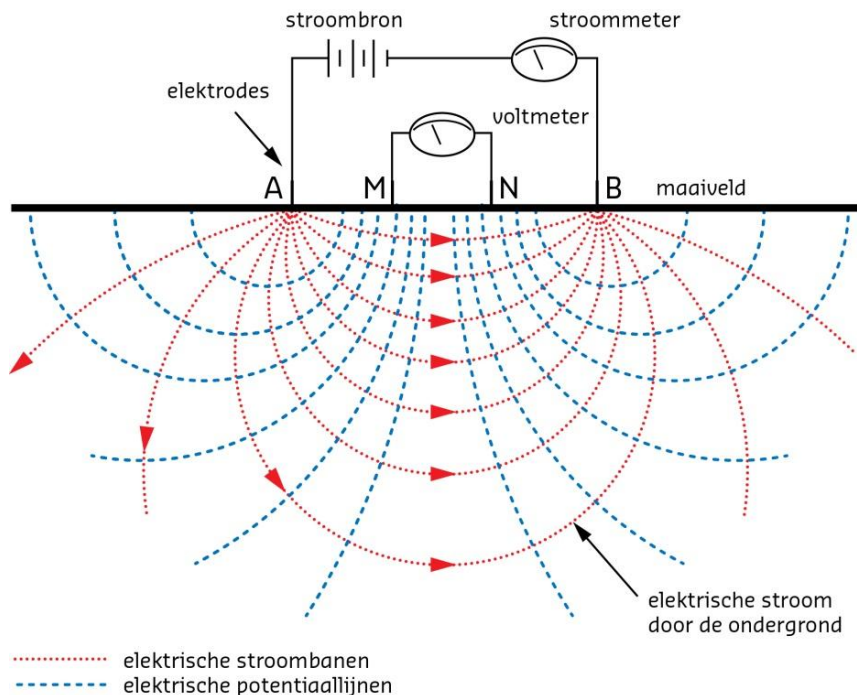


Figure Diafora, Giovanni 13RS 01NL

Figuur 12 –Principe van elektrische weerstandsmethode, ERT

Toepassingen

ERT wordt toegepast in onderzoek naar verontreinigingen, de grondwaterspiegel (relevant in gebieden met diep grondwater), verzilting, detectie van holtes en tunnels, de stabiliteit van hellingen en het inschatten van in situ grondeigenschappen als verzadiging, porositeit en permeabiliteit. Ook kan ERT worden ingezet bij het lokaliseren van lekken in foliekuipen.

Resolutie en dieptebereik

De resolutie en het dieptebereik hangen af van de gekozen elektroden configuratie. Het dieptebereik hangt samen met de grootste afstand tussen de stroomelektroden. Als vuistregel kan uitgegaan worden van een dieptebereik van ca. een derde van de afstand tussen de stroomelektroden. De resolutie bedraagt ongeveer 20% van het dieptebereik en neemt af met de diepte. Voor geotechnische toepassingen kan een dieptebereik van 20 tot 30 m behaald worden.

Beperkingen en ruis

Als randvoorwaarde voor succesvolle metingen geldt dat er voldoende fysisch contrast (elektrische geleidbaarheid) moet zijn tussen de onderzoeken eenheden en dat er voldoende elektrisch contact is tussen de elektroden en de grond en het daarin aanwezige bodemvocht.

Indien er een sterk geleidende laag in de ondergrond aanwezig is, zal de stroom zich preferentieel in deze laag bevinden. Hierdoor is het niet mogelijk om informatie van de weerstandsverdeling onder deze geleidende laag te verkrijgen.

In het westen van Nederland is het ondiepe grondwater vaak zout, waardoor het geleidend is. Dit kan de interpretatie van de ERT metingen beïnvloeden.

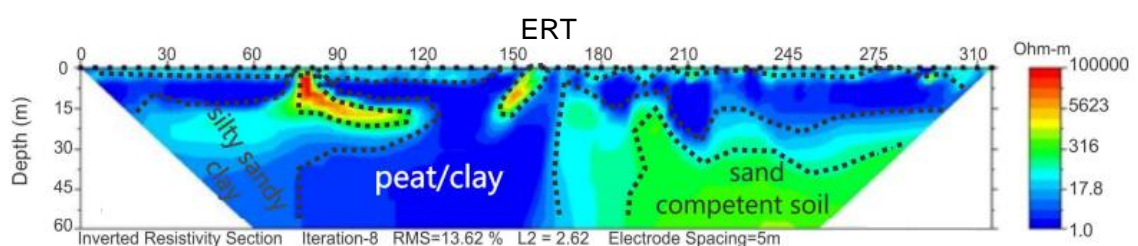
Om van de metingen te komen tot een model van de weerstandsverdeling in de ondergrond is inversie nodig. Bij ERT speelt het equivalentie-probleem. In de praktijk wordt dit opgelost door berekeningen te maken met veel modellen en te zoeken naar het model dat de kleinste afwijking heeft tussen het model en de meting. Met a priori kennis (boring of sondering) kan het beste ondergrondmodel beter bepaald worden. Ook kan de inversie verbeterd worden door metingen met meerdere configuraties, grotere en kleinere elektrodenafstanden toe te voegen.

Ruis kan veroorzaakt worden door inductie in de bekabeling en door geleidende objecten nabij de meetlijn (bijv. ondergrondse kabels). Een deel van de ruis kan voorkomen worden door de kabels elektrisch goed af te screenen. Lagen met een hoge elektrische weerstand aan het maaiveld (bijv. asfalt) zorgen ervoor dat de stroom niet in de grond kan komen. In specifieke gevallen kan dit opgelost worden door gaten te boren in het asfalt en de elektroden op diepte te plaatsen. Indien mogelijk worden de elektrodes niet in, maar naast het asfalt geplaatst. Een andere beperking is bevroren grond, omdat ijs niet geleidend is.

Het plaatsen van de elektroden kan arbeidsintensief zijn. Tegenwoordig zijn er sleepelektroden beschikbaar, die via capacitieve koppeling de stroom in de grond brengen.

Voorbeeld

De stabiliteit van een fundering wordt mede bepaald door de homogeniteit van de stijfheid van de ondergrond. Om differentiële zetting en compactie te voorkomen is inzicht nodig in de diepte en dikte van veen en klei in de ondergrond. Vanwege hun hoge porositeit en mineralogische compositie hebben veen en klei een lage elektrische weerstand in vergelijking met zand. [Figuur 13](#) toont de resultaten van een ERT studie die gedaan is voor geotechnische doeleinden [19]. De laterale en verticale variatie in elektrische weerstand is vertaald naar verschillen in grondsoort. Aan de rechterzijde van het profiel is zand (geschikt voor funderingen) aanwezig. Aan de linkerzijde zijn veen en klei te herkennen aan de lage elektrische weerstanden. Deze interpretatie is geverifieerd met informatie van sonderingen die in het gebied zijn geplaatst.



Figuur 13 –Voorbeeld van resultaat van ERT studie. De elektrische weerstand is weergegeven in de kleurschakering (lage weerstand = blauw, hoge weerstand is rood). Het contrast in weerstand tussen zand en veen/klei maakt het mogelijk om de geologische eenheden van elkaar te onderscheiden. Uit [19].

5.3.2 Spontane Potentiaal methode (SP)

Principe

De spontane potentiaal methode (spontaneous potential of self potential, SP) is gebaseerd op het principe dat stromend water in de ondergrond een verschuiving veroorzaakt in de verdeling van de ionen in het grondwater. Hierdoor ontstaan kleine verschillen in elektrische potentiaal, in de ordegrootte van millivolts (mV). Ook een chemische potentiaal of temperatuurverschillen kunnen een elektrische stroom opwekken in de ondergrond. Om deze

kleine potentiaalverschillen nabij het maaiveld te kunnen meten zijn speciale elektrodes nodig. De potentialen worden in een grid van elektrodes gemeten ten opzichte van een referentie elektrode. Het grote verschil met ERT en IP is dat er bij SP geen elektrische stroom de grond in wordt gestuurd, maar dat er gemeten wordt aan de elektrische stromen die van nature in de grond aanwezig zijn.

Toepassingen

SP kan worden gebruikt voor het opsporen van metaalertsen. Geotechnische toepassingen zijn te vinden in het lokaliseren van anomalieën in stroming van water, lekkages in dijken, dammen en stortplaatsen en het vaststellen van de hydraulische gradiënt.

Resolutie en diepte-bereik

De bron van de te meten potentiaalverschillen bevindt zich in de ondergrond. Of deze signalen te meten zijn, is afhankelijk van de combinatie van diepte en sterkte van de bron (waterstroming), ruis en de gevoeligheid van de sensor. De elektroden afstanden worden aangepast op de te verwachten anomalieën.

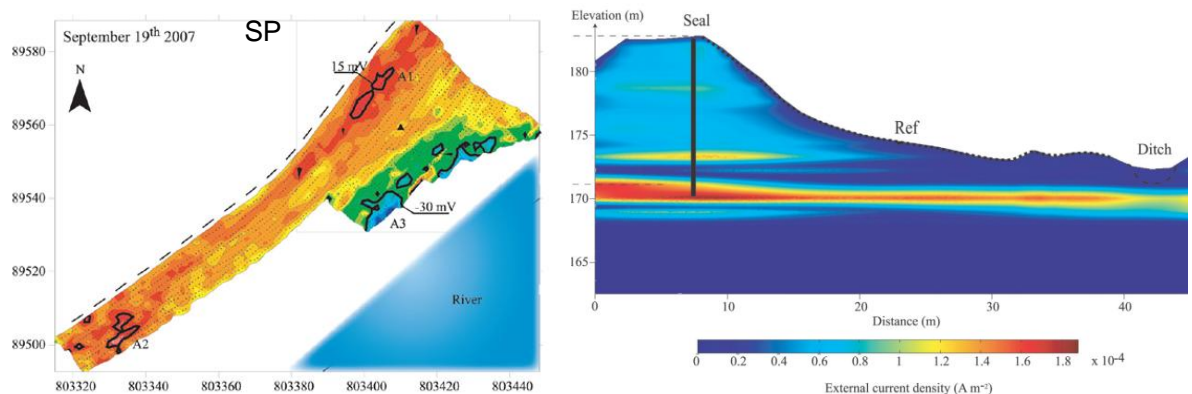
Beperkingen en ruis

In vergelijking tot andere elektrische methoden, zoals ERT, gebruikt SP speciale elektroden. Deze elektroden zijn duurder dan de standaard elektroden die gebruikt worden voor ERT.

Ruisbronnen voor het SP signaal bestaan uit zonnestormen, natuurlijke elektrische stromen door de aardkorst (magneto-tellurische stromen), drift van het meetinstrument, temperatuurwisselingen en ultraviolet licht. Bij iedere SP meetserie moeten deze ruisbronnen geïdentificeerd en gekwantificeerd worden om de ruwe SP data te kunnen corrigeren. Om de ruis te beperken wordt aangeraden om de elektrodes in te graven. In bebouwde omgeving is er tevens storing van zwerfstromen, trein, trams, metro en overig verkeer.

Voorbeeld

Een voorbeeld van een toepassing van SP is het onderzoek van een dijk langs de Rhône, Frankrijk [20]. Hier zijn SP metingen gecombineerd met ERT. Het doel was om de locatie van mogelijke lekkage vast te stellen door de preferentiële waterstroming af te beelden in de ondergrond van de dijk. De dijk langs de Rhône is anders dan een typische Nederlandse dijk: de kleilaag bedekt niet de dijk aan de bovenkant, maar alleen aan de rivierzijde. Het resultaat van de SP metingen is weergegeven in [Figuur 14](#). Uit de ruwe SP data (linker paneel) is af te leiden dat er waterstroming is van de rivier af door de dijk heen. Door de SP data te koppelen met de ERT data en te inverteren is een dwarsdoorsnede afgeleid waarin een dun horizontaal oppervlak met versterkte waterstroming door de dijk heen is te herkennen ([Figuur 13](#), rechter paneel).



Figuur 14 – Voorbeeld van het resultaat van SP metingen over de dijk langs de Rhône rivier (Frankrijk) ten behoeve van het detecteren van lekkage onder de dijk door. Links: De potentiaalwaarden zijn aangegeven met kleur variërend van blauw (negatief) via geel (neutraal) tot rood (positief). Rechts: Verdeling van de stroomdichtheid, afgeleid van de inversie van SP data (links) en de weerstandsverdeling uit ERT metingen. De hoge dichtheid op ca. 12 m onder de top van de dijk (rode kleur) duidt op een laag waar stroming van water optreedt. Bewerkt uit [20].

5.3.3 Geïnduceerde polarisatie (IP)

Principe

In kleimineralen kan elektrische stroom opgeslagen worden, als in een condensator. Wanneer bij bijv. de ERT methode een stroom de grond in wordt gestuurd, kan elektrische lading opgeslagen worden als er klei in de bodem aanwezig is. Wanneer de stroom bij de stroomelektroden uitgezet wordt, blijft er een reststroom achter in de grond die afneemt met de tijd totdat er evenwicht is bereikt. Dit fenomeen heet geïnduceerde polarisatie (induced polarisation, IP). De geïnduceerde polarisatie is afhankelijk van de frequentie van de opgelegde stroom.

Uit het verloop van het voltage met de tijd is de oplaadbaarheid (chargeability) van de bodem af te leiden. De oplaadbaarheid hangt samen met de grondsoort: bij een groter specifiek oppervlakte en hoeveelheid ionen in het mineraal is het IP effect groter. In klei-rijke grond is het IP effect derhalve groter dan in zandgrond. De ERT en IP metingen kunnen tegelijkertijd uitgevoerd worden met dezelfde apparatuur. Door zowel ERT als IP data te interpreteren kan het ondergrondmodel beter worden vastgesteld dan met slechts één methode.

Toepassingen

IP wordt ingezet bij de exploratie van ertsen. Recentelijk zijn er echter toepassingen voor geotechnische vraagstukken en voor milieuvraagstukken bijgekomen. IP kan ingezet worden bij de detectie van klei in de ondergrond en bij het vaststellen van verontreinigingspluimen.

Resolutie en dieptebereik

De resolutie en dieptebereik zijn vergelijkbaar met die van ERT. De resolutie hangt samen met de afstand tussen de elektroden. Het dieptebereik hangt samen met de grootste afstand tussen de elektroden. Voor geotechnische toepassingen kan een dieptebereik van 20 tot 30 m met een resolutie van ca. 2 tot 3 m behaald worden. Evenals met ERT neemt de resolutie van IP af met de diepte.

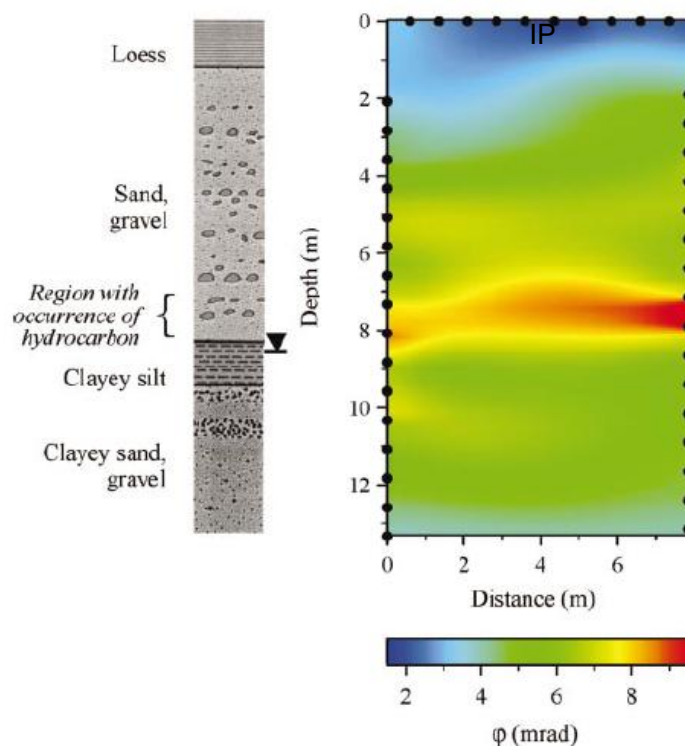
Beperkingen en ruis

De beperkingen en ruis zijn hetzelfde als voor ERT: Er dient voldoende contrast te zijn tussen de te onderzoeken eenheden en voldoende elektrisch contact tussen de elektroden en de grond en het daarin aanwezige bodemvocht. Ruis wordt veroorzaakt door bekabeling en geleidende objecten nabij de meetlijn. Een deel van de ruis kan voorkomen worden door de kabels elektrisch goed af te screenen. Lagen met hoge weerstand aan het maaiveld zijn een belemmering voor het injecteren van voldoende stroom.

Ruis kan veroorzaakt worden door inductie in de bekabeling en door natuurlijke variaties in voltages. Storende invloeden komen van geleidende objecten nabij de meetlijn (bijv. ondergrondse kabels)

Voorbeeld

De aanwezigheid van een verontreiniging in de ondergrond heeft invloed op het elektrische gedrag van de ondergrond. Het IP effect kan gebruikt worden om een verontreiniging met minerale olie te lokaliseren in de ondiepe ondergrond. In [Figuur 15](#) is een voorbeeld van een IP resultaat weergegeven [21]. Dit voorbeeld is gemaakt met een gecombineerde cross-hole en down-hole configuratie van elektroden. De elektroden waren aan het maaiveld geplaatst en in een boorgat. De kleurschakering geeft de oplaadbaarheid weer. Op ca. 8 m diepte is een duidelijke anomalie in de oplaadbaarheid aanwezig. Deze komt overeen met de aanwezigheid van minerale olie in boringen op die diepte. Met IP is er een lateraal beeld verkregen van de verdeling van de minerale olie verontreiniging tussen de boorgaten in. Door het gebruik van zowel ERT als IP is er beter onderscheid te maken in de effecten van grondsoort en de porievloeistof op het geo-elektrische signaal. In de geotechniek kan IP worden ingezet om kleilagen beter te visualiseren dan met ERT alleen.



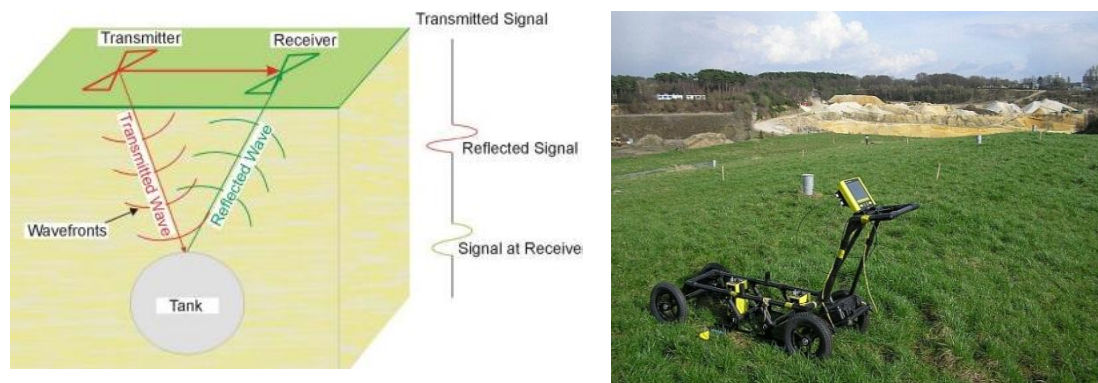
Figuur 15 – Voorbeeld van een IP resultaat van een gecombineerde down-hole/cross-hole meting. De elektrodes zijn weergegeven met zwarte punten. De rode anomalie op ca. 8 m diepte wordt veroorzaakt door de aanwezigheid van een verontreiniging met minerale olie (uit [21] aangepast).

5.4 Elektromagnetische methoden

5.4.1 Grondradar (GPR)

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 16](#)). 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 16 –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. Figuur van Central Federal Lands Highway (www.cflhd.gov). Rechts: GPR apparatuur.

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.

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 damping). 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.

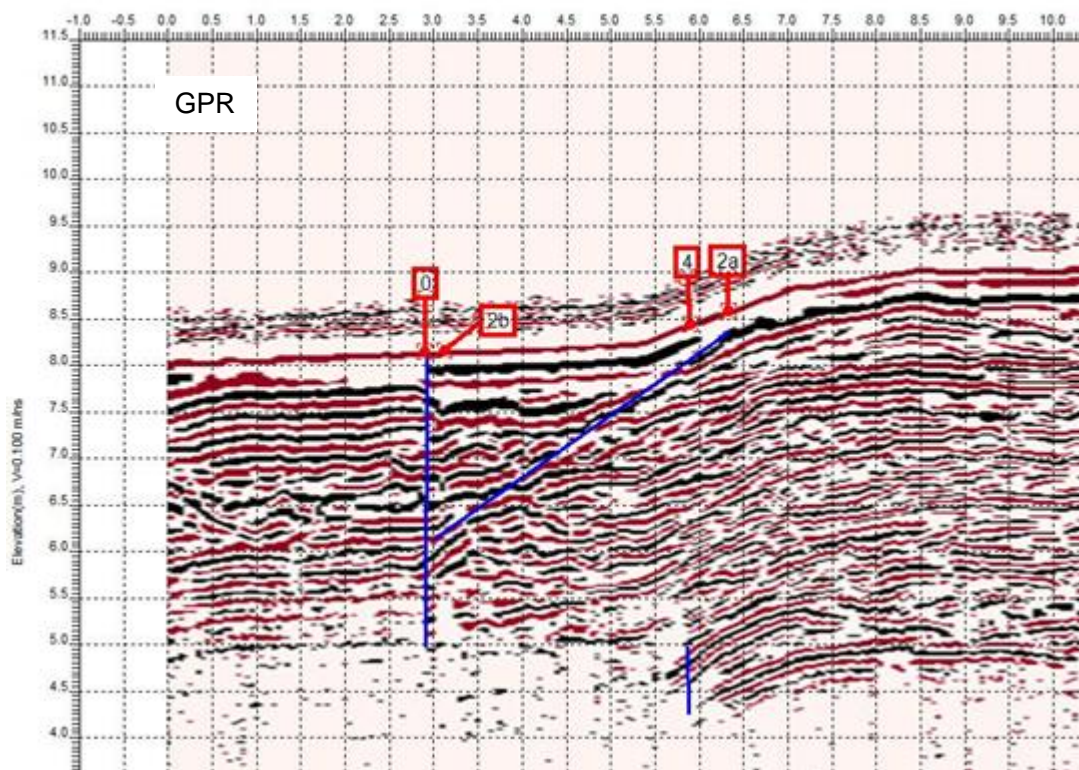
Beperkingen en ruis

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.

Voorbeeld

Grondradar kent veel toepassingen in de geotechniek. Een voorbeeld is gegeven in het Geo-impuls pilot project “Flankenonderzoek A1-A6” [22] (zie [Figuur 17](#)). 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 werd. 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 17 – Voorbeeld van grondradar (GPR) resultaat [22] 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.

5.4.2 Elektromagnetische metingen

Principe

Electromagnetische methoden kunnen worden toegepast in het frequentiedomein (Frequency Domain ElectroMagnetics, FDEM) en in het tijddomein (Timedomain ElectroMagnetics, TEM). Beide methoden zijn gebaseerd op inductie van elektromagnetische signalen. TEM wordt over het algemeen ingezet om informatie te verkrijgen over grotere diepten en wordt daarom in deze handleiding niet uitgelegd. Ondiepere informatie, die relevant is voor geotechnici, wordt verzameld met FDEM.

Bij FDEM wordt door een zendspoel een elektromagnetisch veld opgewekt dat in de ondergrond wervelstromen induceert. De sterkte van deze stromen hangt af van de elektrische geleidbaarheid. Het magnetische veld opgewekt door de zendspoel en door de in de grond geïnduceerde stromen wordt gemeten met een ontvangspoel. Door de grootte en fase van het ontvangen veld te meten, kan de elektrische geleidbaarheid (inverse van elektrische weerstand) afgeleid worden. Een voordeel van deze techniek is dat er is geen contact met de grond nodig is. Hierdoor is snelle data-acquisitie mogelijk.

Het opgevangen FDEM signaal is de totale respons van de wervelstromen uit een bepaald dieptetraject. Door met een vaste spoelafstand een grid over het maaiveld in te meten wordt een verdeling van de geleidbaarheid over een bepaald dieptetraject in het horizontale vlak

gegeven. Door de spoelafstand en/of de frequentie en/of de oriëntatie van de spoelen te variëren, kan informatie worden verkregen over verschillende dieptetrajecten. In [Figuur 18](#) is een voorbeeld van een meetinstrument in het veld weergegeven. Dit instrument heeft een vaste spoelafstand en frequentie. Door de oriëntatie van het instrument te veranderen (horizontaal of verticaal), kan informatie over twee dieptetrajecten worden ingewonnen.

Elektrische geleidbaarheid hangt samen met de mineralogische samenstelling van de ondergrond, de porositeit en de hoeveelheid en samenstelling van het poriewater.



Figuur 18 – FDEM metingen in het veld.

Toepassingen

FDEM wordt ingezet om inzicht te verkrijgen in de ruimtelijke verdeling van bijvoorbeeld verontreinigingen in de ondiepe ondergrond (gebruikelijk tot 3 à 6 m diepte). Onder bepaalde omstandigheden (geen metalen, geen klei, niet geleidende ondergrond) kan de porositeit afgeleid worden uit de elektrische geleidbaarheid.

Resolutie en dieptebereik

Het dieptebereik van FDEM hangt af van de afstand tussen en de oriëntatie van de spoelen. Veel gebruikte FDEM apparaten met vaste spoelafstand ([Figuur 18](#)) hebben een spoelafstand van ongeveer 3 m. Bij het veelgebruikte EM31 instrument is - afhankelijk van de oriëntatie van het apparaat - het bijbehorende dieptebereik ca. 3 of 6 m. Bij zeer slecht geleidende ondergrond is het dieptebereik vaak groter. Recentelijk zijn er apparaten op de markt gekomen met andere spoelafstanden en meerdere frequenties. Hierdoor is informatie te verkrijgen over meerdere dieptetrajecten.

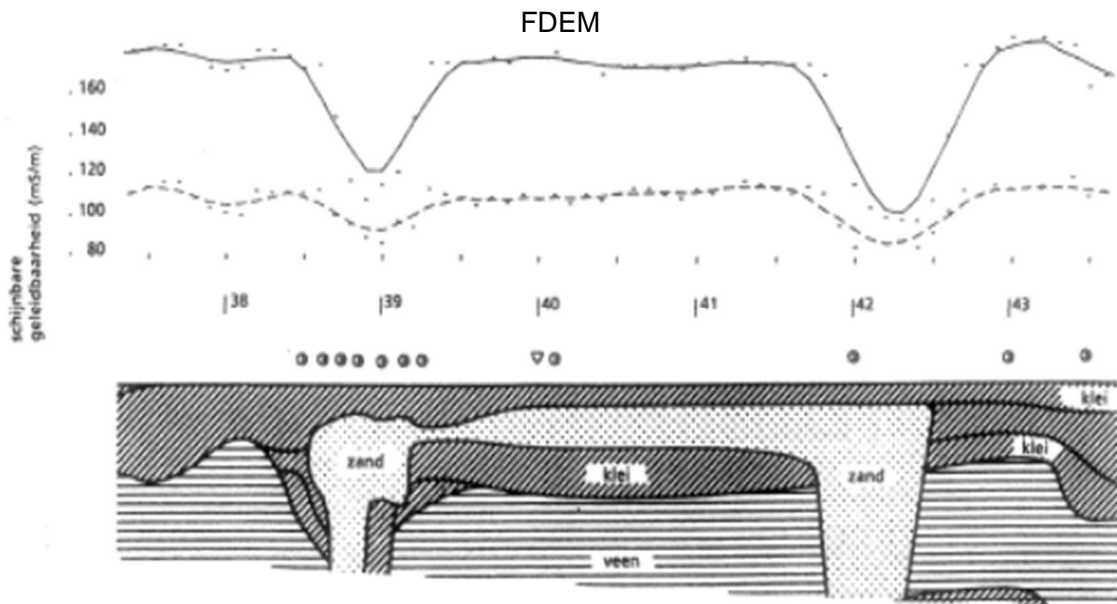
Beperkingen en ruis

Geleidende objecten in de omgeving van de apparatuur hebben invloed op de metingen. In bebouwde omgevingen is er bijvoorbeeld veel ruis van auto's, hekjes etc. Ook storen onder- en bovengrondse kabels en leidingen en hoogspanningsmasten en -draden.

Voorbeeld

Bij een tracéverkenning, bijvoorbeeld voor de aanleg van een weg, is gebruik gemaakt van elektromagnetische metingen ([Figuur 19](#)). Voor deze locatie was uit andere bronnen bekend dat de ondergrond lateraal heterogeen was. In plaats van het plaatsen van sonderingen en boringen met een standaard onderlinge afstand is eerst met FDEM inzicht verkregen in de heterogeniteit (bovenste paneel). Op basis hiervan zijn de boringen en sonderingen gepland.

Het resulterende geotechnische profiel (onderste paneel) is geconstrueerd door de informatie uit FDEM, de boringen en de sondering te combineren.



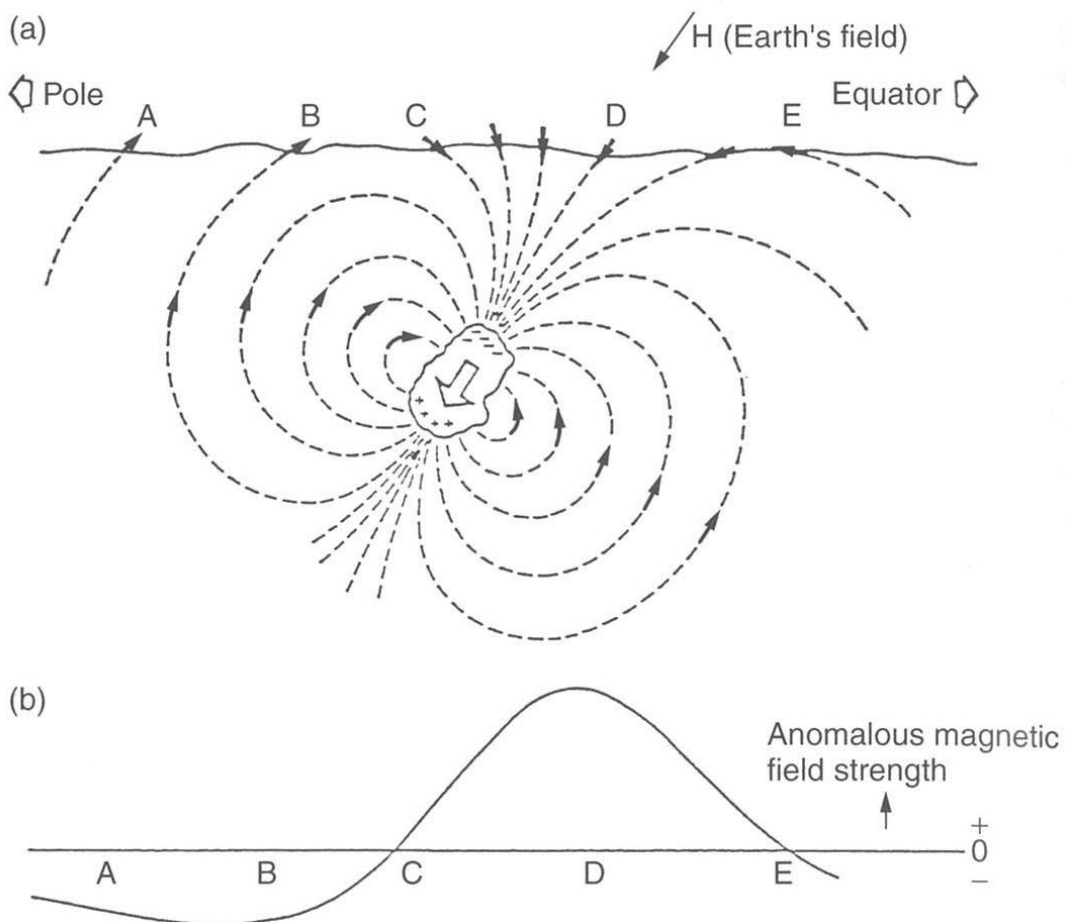
Figuur 19 – Voorbeeld van een geotechnische toepassing van FDEM. Boven: FDEM profiel van schijnbare geleidbaarheid met twee verschillende oriëntaties van het FDEM instrument (doorgetrokken lijn en gestreepte lijn). Onder: Locatie van boringen (cirkels) en sondering (driehoek) en het afgeleide geotechnische profiel.

5.5 Magnetische methode

Voor geotechnische toepassingen in Nederland is het gebruik van de magnetische methode gering. Omdat geotechnici de methode wel kunnen tegenkomen in achtergronddocumenten of bij werk in het buitenland, is de beschrijving van de techniek voor de volledigheid opgenomen.

Principe

Magnetische methoden meten kleine, lokale variaties in het magnetisch veld van de aarde. Deze variaties worden veelal veroorzaakt door ertslichamen en stollingsgesteenten, maar ook door magnetische objecten en door archeologische objecten ([Figuur 20](#)). De magnetische veldsterkte wordt gemeten over een lijn of een grid. Aangezien het aardmagneetveld in de tijd niet constant is, wordt meestal een gradiënt magnetometer ingezet, die een verschilmeting doet tussen twee sensors. Voor magnetische metingen op land is een draagbare cesium vapor magnetometer geschikt. Voor toepassing onder water zijn speciale modellen beschikbaar die achter een schip in het water worden gehangen. Er zijn ook magnetometers die aan een helikopter gehangen kunnen worden.



Figuur 20 – Principe van magnetometrie. Een magnetisch object in het aardmagneetveld veroorzaakt plaatselijke afwijkingen (boven) die in een profiel over het object gemeten kunnen worden (onder). Figuur uit [23], aangepast.

Toepassingen

De toepassing van de magnetische methode voor geotechnisch onderzoek is gering. Op land wordt de magnetische methode ingezet bij geologische onderzoeken, het opsporen en karteren van ertslichamen en andere grondstoffen, bij archeologisch onderzoek en bij het opsporen van niet gesprongen explosieven (UXO's). Toepassing is niet alleen vanaf het maaiveld maar ook vanuit boorgaten. Op water is de magnetische methode geschikt voor het zoeken naar scheepswrakken, ankers, ankerkettingen, pijpleidingen etc.

Resolutie en dieptebereik

De magnetische anomalie is afhankelijk van de grootte, diepte, vorm van het object en de locatie op aarde (in verband met de sterkte van het aardmagneetveld). Per object kan op basis van natuurkundige formules ingeschat worden welke objecten theoretisch gedetecteerd kunnen worden.

Beperking en ruis

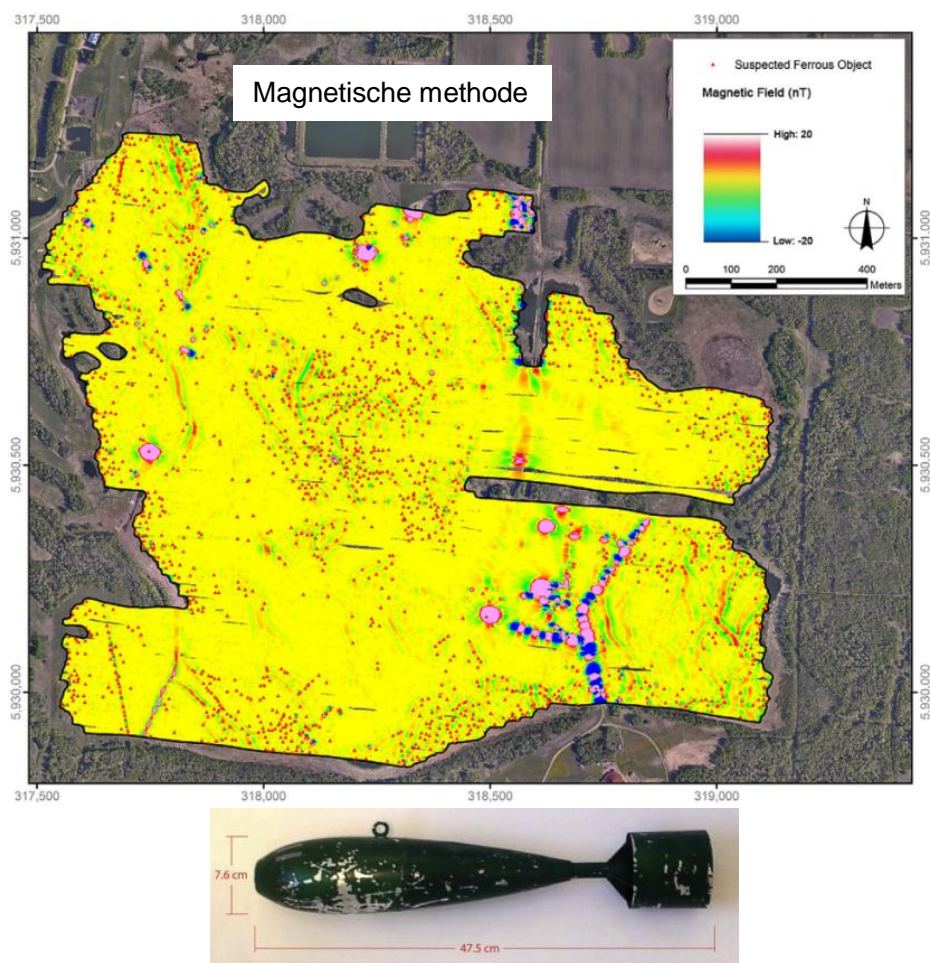
Wanneer niet alleen de locatie, maar ook de diepte en/of grootte van een object moet worden afgeleid, dan heeft de magnetische methode last van equivalentie. Een groot object op grotere diepte kan hetzelfde magnetische signaal geven als een kleiner object op kleinere diepte. Ook is de vorm van het object van belang. De afgeleide diepte is derhalve indicatief en zal met andere methodes geverifieerd moeten worden.

In stedelijke of bebouwde omgeving geven ijzeren en stalen objecten magnetische ruis. Bij toepassing op water dient de magnetometer ver achter het schip gehangen te worden, om het storende magnetische effect van het stalen schip op de meting te voorkomen.

Zonnestormen hebben invloed op het magnetische veld dat op het aardoppervlak gemeten wordt. Tijdens een dergelijke magnetische storm, die enige dagen kan aanhouden, kunnen praktisch geen magnetische metingen gedaan worden. Verder hebben zon en maan een kleine invloed die gedurende de dag varieert. Voor deze invloed dient gecorrigeerd te worden, bijvoorbeeld door het gebruik van een gradiënt magnetometer.

Voorbeeld

[Figuur 21](#) laat een voorbeeld zien van magnetometer metingen die boven een meer gedaan zijn vanuit een helikopter [24]. Dit meer was vroeger een test locatie. Bij deze survey zijn meer dan 2000 magnetische anomalieën gevonden. Dit suggereert dat de bommen van verschillende types verspreid aanwezig zijn. Verder blijkt uit de grootte van de anomalieën dat de niet-gesprongen explosieven over het algemeen kleiner zijn dan 50 cm.



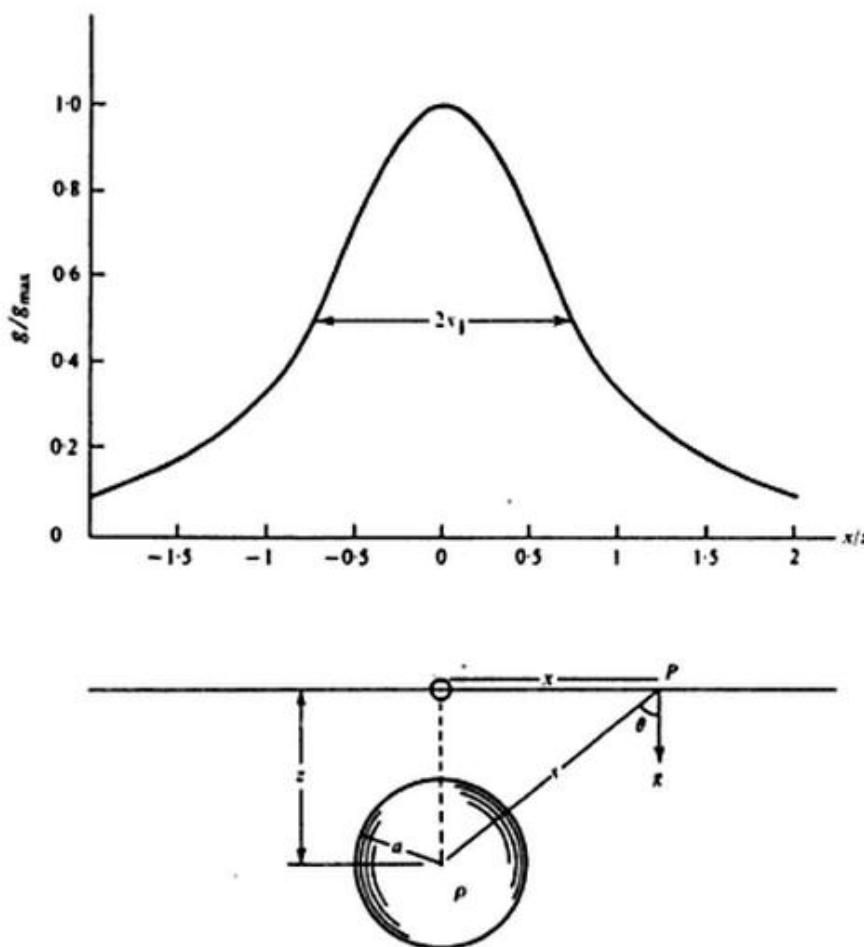
Figuur 21 - Boven: Kaart met magnetische anomalieën in een meer dat eerdere als test locatie is gebruikt. De kleurcodering geeft de magnetische veldsterkte weer, de rode punten de locaties waar magnetische objecten vermoed worden. Onder: voorbeeld van niet gesprongen explosief uit het meer. Uit [24], aangepast.

5.6 Micro-zwaartekracht methode

Voor geotechnische toepassingen in Nederland is het gebruik van de micro-zwaartekracht methode gering. Alleen voor holte onderzoek in Limburg wordt de methode in Nederland ingezet. Voor de volledigheid is de micro-zwaartekracht methode opgenomen in deze handreiking.

Principe

De micro-zwaartekrachtsmethode of micro-gravimetrie is gebaseerd op de verdeling van massa in de aarde. De dichtheidsverdeling beïnvloedt namelijk de waarde van de zwaartekrachtsversnelling (Figuur 22). De aanwezigheid van objecten met hoge dichtheid of holtes (op meter schaal) veroorzaakt lokaal afwijkingen in de zwaartekrachtsversnelling, die met een gevoelige gravimeter kunnen worden gemeten. "Micro" slaat op het feit dat in principe erg kleine variaties gemeten kunnen worden, in de ordegrrootte van μgal . Ter vergelijking: de gemiddelde zwaartekrachtsversnelling aan het maaiveld in Nederland bedraagt 981 gal ($\approx 9,81 \text{ m/s}^2$). Om deze benodigde nauwkeurigheid te bereiken, duurt een meting vrij lang (enkele minuten tot een half uur). Het is derhalve een relatief langzame methode.



Figuur 22 – Principe van de zwaartekrachtsmeting. Het object met een afwijkende dichtheid (onder) geeft een afwijking in de zwaartekracht wanneer er een profiel overheen gemeten wordt. (boven). In het voorbeeld is de anomalie van een bol weergegeven. De grootte van de anomalie hangt af van de diepte de straal en het dichtheidscontrast. Figuur uit [14]).

Toepassingen

Er zijn veel toepassingsmogelijkheden van gravimetrie, maar vooral buiten Nederland: onderzoek naar de waterspiegel (bijv. gemiddeld zeeniveau, gemeten vanuit satelliet), onderzoek naar dynamiek van de aarde, precieze bepaling van hoogtes, onderzoeken ten behoeve van natuurlijke hulpbronnen. Geotechnische toepassingen (micro-gravimetrie) zijn voornamelijk in de detectie van holtes en bijvoorbeeld onderzoek aan karstverschijnselen in de ondiepe ondergrond. De Nederlandse toepassingen zijn beperkt tot onderzoek naar verborgen mergelgrotten of mijngangen in Limburg.

Resolutie en diepte-bereik

Verticale en laterale resolutie hangen af van de afstand tussen de metingen. De resolutie neemt af met de diepte. Het detectievermogen van gravimetrie is afhankelijk van het dichtheidscontrast. Onder gunstige omstandigheden (geen ruis) kan een met lucht gevulde holte van 1 meter tot een diepte van 10 tot 20 m diepte gedetecteerd worden.

Beperkingen en ruis

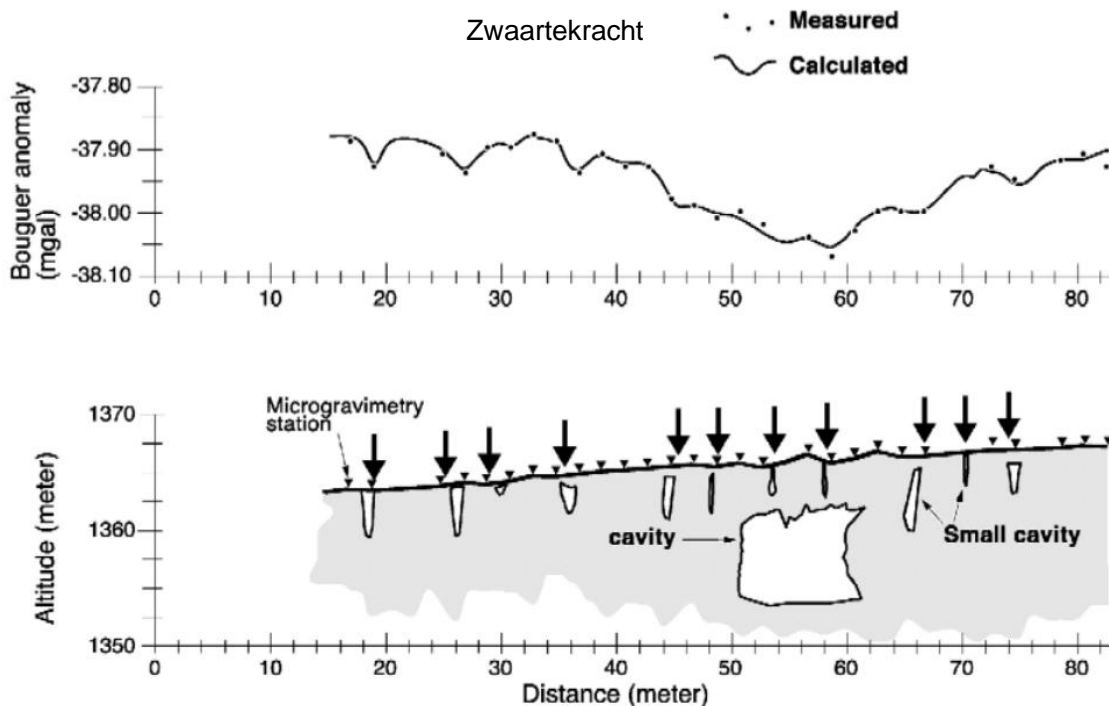
Gravimeters zijn erg gevoelig. Indien voldoende tijd wordt uitgetrokken voor de meting (in verband met de stabiliteit van het apparaat), kunnen zwaartekrachtsvariaties veroorzaakt door kleine topografische verschillen al gemeten worden. Bij de interpretatie van de metingen dienen een aantal correcties worden uitgevoerd, bijvoorbeeld correctie voor breedtegraad, voor hoogte boven zeeniveau, getij en drift van het instrument.

Bij het omzetten van de metingen om te zetten naar een dichtheidsverdeling in de ondergrond speelt het equivalentie probleem. Een groter object met afwijkende dichtheid op grotere diepte kan hetzelfde signaal opleveren als een kleiner object op kleinere diepte. De gegevens dienen te worden gecombineerd met ander type gegevens om het meest waarschijnlijke ondergrondmodel af te leiden.

Ruis wordt veroorzaakt door bijvoorbeeld harde wind of andere trillingen. De gravimeter kan dan niet met voldoende nauwkeurigheid meten. Ook in bebouwd gebied zijn er omgevingsfactoren die ruis geven (o.a. verkeer, bewegingen en menselijke activiteiten).

Voorbeeld

Holtes en karstverschijnselen hebben invloed op de stabiliteit van de grond. In geotechnisch onderzoek wordt vaak grondradar (GPR) ingezet voor de detectie van holtes. Wanneer een aanvullende methode gewenst is, valt de keuze vaak op micro-zwaartekracht. [Figuur 23](#) geeft een voorbeeld van de resultaten van microzwaartekracht in een gebied met karstverschijnselen [25]. Op basis van de micro-zwaartekrachtmetingen ([Figuur 23](#), bovenste paneel) en GPR data is er een ondergrondmodel gemaakt met diverse grotere en kleinere holtes ([Figuur 23](#), onderste paneel). De micro-zwaartekrachtsdata die theoretisch berekend zijn op basis van dit model zijn in het bovenste paneel weergegeven. Deze berekende waarden komen goed overeen met de gemeten waarden.

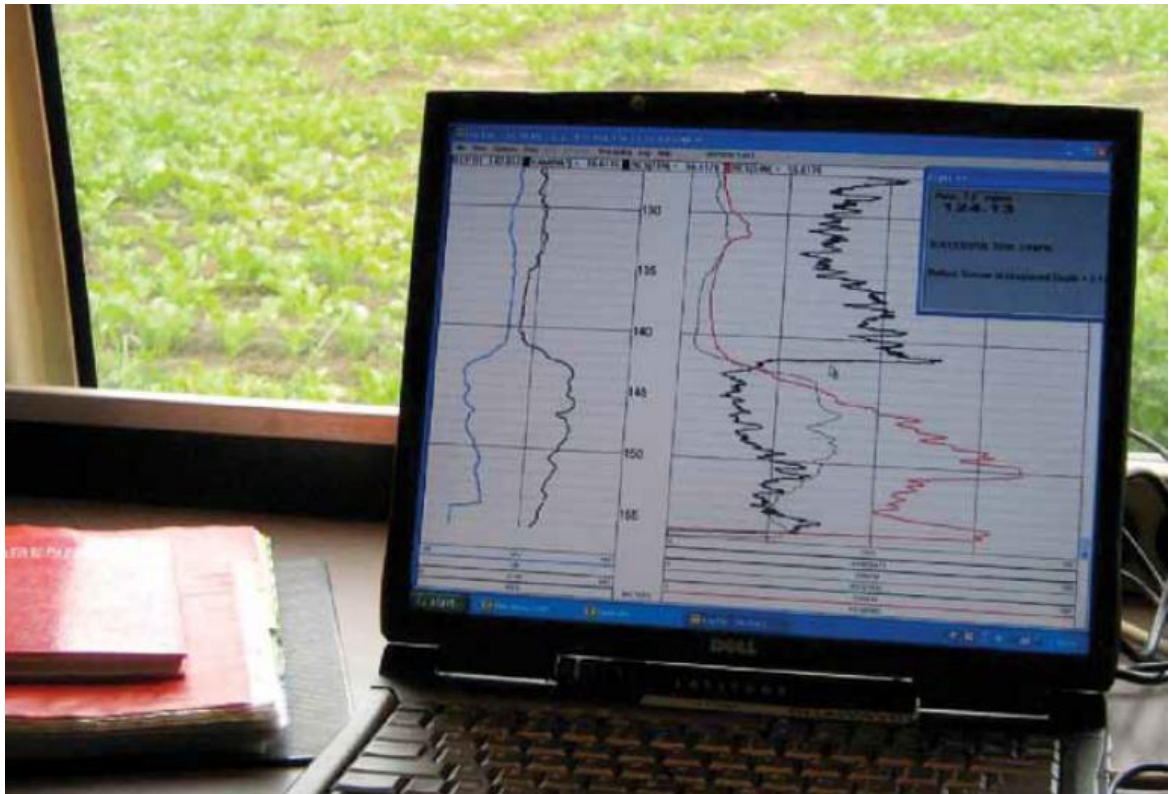


Figuur 23 – Voorbeeld van resultaten van micro-zwaartekrachtmetingen. Boven: de metingen (punten) en de berekende waarden (doorgetrokken lijn) op basis van het ondergrondmodel (onder) dat geconstrueerd is op basis van GPR en micro-zwaartekracht. Uit [25].

5.7 Boorgatmeten

Principe

Er kunnen verschillende soorten metingen gedaan worden in een boorgat ([Figuur 24](#)). Afhankelijk van de sonde kan de elektrische weerstand, spontane potentiaal, boorgatdiameter, natuurlijke gammastraling, temperatuur, elektromagnetische inductie en/of spectraal gamma gemeten worden. Natuurlijke gammastraling geeft informatie over grondsoort en bijmengingen, spectraal gamma over de korrelgrootteverdeling. Metingen worden vaak gecombineerd (bijv. gamma en weerstand) om de ondergrond te beschrijven. Regelmatig worden nieuwe sondes ontwikkeld voor nieuwe toepassingen.



Figuur 24 – Een voorbeeld van een boorgatmeting

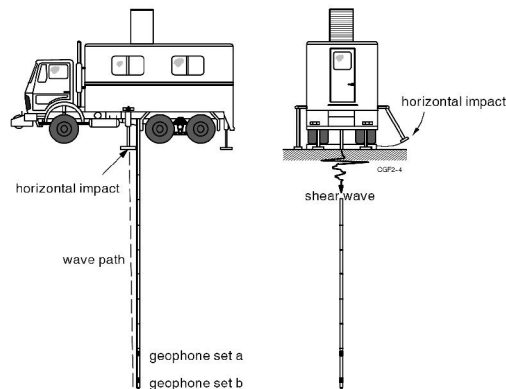
Toepassingen

Voorbeelden van toepassingen van boorgatmetingen zijn het bepalen van optimale filterstellingen in waterdoorlatende pakketten, de exacte dieptebevestiging van kleiafdichtingen, bepaling van grenzen tussen zoet, brak en zout grondwater, meten van productie van verschillende filters, monitoring van kwaliteit van grondwater, detectie van filterverstopping, informatie over grondsoort.

5.8 Speciale conussen

Een standaard CPT meet de conusweerstand, de kleefweerstand en optioneel de waterspanning. Op of in een conus voor een sondering kunnen extra sensoren geplaatst worden om een ander type informatie van de ondergrond te verzamelen dan de standaardparameters. Voorbeelden van speciale conussen zijn de seismische conus, de ERT conus en de magneto-conus.

In een seismische conus (SCPT) zijn naast de standaard conus één of twee sets geofoons ingebouwd. De conus wordt zoals gebruikelijk naar beneden gedrukt, maar er wordt bij elke meter (of ander interval) gestopt om een seismische meting uit te voeren met een seismische bron vanaf het maaiveld ([Figuur 25](#)). Uit de positie van de geofoon en uit de reistijd en de positie van de geofoon is de golfvoortplantingssnelheid te bepalen. Door metingen op meerdere dieptes uit te voeren kan een snelheidsprofiel met de diepte bepaald worden. Het voordeel van het gebruik van een dubbele set geofoons is dat de intervalsnelheid eenvoudig gemeten kan worden gemeten. De intervalsnelheden kunnen worden gebruikt voor de berekening van de dynamische elastische moduli van de bodem.



Figuur 25 – Links: Boorwagen met SCPT met seismische bron. Rechts: schets van boorwagen met seismisch conus in de grond.

Een tweede speciale conus is de ERT conus (ook wel grondsonde, [figuur 26](#)). De conus van de grondsonde is voorzien van twee sets elektroden. Iedere set bestaat uit vier elektroden: twee stroomelektroden en twee meetelektroden. De set met de kleinste elektrode afstanden meet de geleidbaarheid in de directe omgeving van de sonde (orde: elektrodeafstand). De andere set meet de geleidbaarheid in een groter volume rondom de conus. De grondsonde wordt gebruikt om de lokale elektrische geleidbaarheid van de ondergrond (grond en poriënwater) te bepalen. Net als bij de seismische conus wordt de ERT conus om de 20 cm (of een ander interval) stilgezet om een meting uit te voeren. De metingen kunnen gebruikt worden om ERT en FDEM-metingen te kalibreren.



Figuur 26 – ERT conus of grondsonde.

Magnetoconus

Indien de CPT uitgerust is met een magnetometer, fungeert deze als metaaldetector. Naast het detecteren van metalen objecten kan met de magnetometerconus tijdens het sonderen voorkomen worden dat elektriciteit voerende leidingen worden geraakt.

Om objecten nauwkeurig te lokaliseren is het belangrijk om de oriëntatie en de positionering van de conus tijdens het meten goed vast te leggen, in horizontale (x en y) en verticale (diepte z) richting. De conus dient zeer zorgvuldig naar het noorden gericht te zijn tijdens de meting. Indien dit niet het geval is, kan uit de metingen geen informatie verkregen worden over het te detecteren object.

Een voorbeeld van de inzet van een magnetoconus binnen geotechnisch onderzoek is het lokaliseren van verankeringen achter kademuren. De lengte en helling van de stalen buispalen kan met de magnetoconus gegevens bepaald worden. Hiervoor is het nodig om heel nauwkeurig te meten en alle oriëntaties vast te leggen.

6 Woordenlijst

Algemene woordenlijst:

Begrip	Omschrijving
Akoestische impedantie	Product van seismische golfsnelheid en dichtheid. Contrasten in akoestische impedantie zorgen voor reflecties en transmissies van seismische golven.
Capacitieve elektroden	Speciale elektroden voor ERT waarbij de stroom niet direct van de elektrode de grond ingebracht wordt (metalen pinnen of niet polariserende elektroden), maar via capacitieve koppeling. De capacitieve elektroden kunnen gesleept worden.
Compressiegolf	Akoestische golf waarbij de deeltjesbeweging in de voortplantingsrichting van de golf is, drukgolf.
Configuratie	De ruimtelijke wijze van plaatsen van geofysische bronnen en ontvangers. De configuratie bepaalt o.a. dieptebereik, resolutie en de oriëntatie van contrasten die gedetecteerd kunnen worden.
CPT	Cone Penetration Test, sondering
Dielektrische constante (ϵ_r)	Parameter die aangeeft in hoeverre een medium elektrische lading vast kan houden als er een elektromagnetisch veld wordt aangebracht. De schaal die relevant is voor geotechnische toepassingen loopt van 1 tot 80. Lucht heeft een lage ϵ_r van 1), water (80), kleigrond en metalen hebben een hoge waarde.
Dispersie	Het verschijnsel dat de voortplantingssnelheid van een golf afhankelijk is van de frequentie, en dus ook van de golflengte.
Elastische moduli	Parameters van een medium die de snelheid van mechanische golven bepalen: compressie modulus (bulk modulus) en schuif modulus (shear modulus).
Elektrische weerstand (ρ)	Parameter die de mate van weerstand tegen het geleiden van elektrische stroom in een medium aangeeft.
Equivalentie	Bij equivalentie kunnen meerdere modellen van de ondergrond de waarnemingen gedaan met een bepaalde methode even goed beschrijven. De verschillende modellen van de ondergrond zijn equivalent aan elkaar. Aanvullende informatie (bijv. uit boringen of andere metingen) kan het aantal modellen dat waarschijnlijk is terugbrengen.
Geofoon	Soort microfoon die bedoeld is om (kunstmatig opgewekte) trillingen (bijvoorbeeld geluidsgolven) op te vangen.
Inversie	Procedure gebaseerd op wiskundige algoritmes om parameters van een medium af te leiden uit metingen en daarmee een model van de ondergrond te verkrijgen.
Oppervlaktegolf	Golf die aan het grensvlak tussen twee media beweegt, bijvoorbeeld aan het grensvlak tussen lucht en grond of tussen water en grond. Er zijn verschillende typen oppervlaktegolven (Rayleigh, Scholte, Love, Lamb).
Resolutie	Scheidend vermogen, beschrijft in hoeverre fenomenen nog net gescheiden kunnen worden waargenomen
Schuifgolf	Golf waarbij de deeltjesbeweging loodrecht op de voortplantingsrichting van de golf is. In vloeistoffen kunnen schuifgolven zich niet voortplanten.

SCPT	Seismische sondering
V_p	Snelheid van een akoestische compressiegolf (druk golf). De snelheid hangt af van dichtheid, bulk modulus en schuif modulus. Hoge V_p in stijve, gecementeerde en verzadigde grond. Lage V_p in onverzadigde, losse, ongeconsolideerde grond.
V_s	Snelheid van een schuifgolf. De snelheid hangt af van dichtheid en schuif modulus. Hoge V_s in stijve grond, nul in vloeistof (geen schuifgolven in vloeistof), lage V_s in losse, ongeconsolideerde grond.

Veelal Engelse termen van methoden:

Methode	Betekenis van afkorting (Nederlandse term)
ERT	Electrical Resistivity Tomography (Elektrische weerstands tomografie)
FDEM	Frequency Domain ElectroMagnetics (Frequentie Domein ElektroMagnetische meting)
GPR	Ground Penetrating Radar (grondradar)
MASW	Multichannel Analysis of Surface waves
SP	Spontaneous Potential of Self Potential (Spontane-, eigen potentiaal)
VSP	Vertical Seismic Profile (Verticaal seismisch profile)

7 Referenties

- [1] CUR, „Risico gestuurd grondonderzoek, van planfase tot realisatie - Richtlijn 247,” 2012.
- [2] ENW, „Grondmechanisch Schematiseren bij Dijken,” Rijkswaterstaat, 2012.
- [3] J. M. Reynolds, An Introduction to Applied and Environmental Geophysics, JOHN WILEY & SONS, 1998.
- [4] The Institution of Civil Engineers, „Geophysics for civil engineers: an introduction,” 2010.
- [5] C. Clayton, M. Matthews en N. Simons, Site Investigation, Wiley-Blackwell, 1995.
- [6] J. A. C. Meekes en B. J. M. Goes, „GeoPASS: a decision support system for selecting the optimal geophysical technique for shallow surveys,” *first break*, vol. 23, nr. 6, pp. 7-12, 2005.
- [7] N. Anderson, N. Croxton, R. Hoover en P. Sirles, „Geophysical Methods Commonly Employed for Geotechnical Site Characterization,” Transportation Research Board, 2008.
- [8] D. M. McCann, M. G. Culshaw en P. J. Fenning, „Setting the Standard for Geophysical Surveys in Site Investigation,” *Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications*, vol. 12, nr. 1, pp. 3-34, 1997.
- [9] M. van Staveren en P. Litjens, „GeoRM: Risicogestuurd werken als eindresultaat van Geo-Impuls,” *Geotechniek*, pp. 14-17, 2012.
- [10] Geo-Impuls, „Handleiding voor het opstellen van een betrouwbaar geotechnisch ondergrond model’ rapport 1209346-006-GEO-0001,” Deltares, Delft, 2014.
- [11] N. L. Anderson, N. Croxton, R. Hoover en P. Sirles, „Geophysical Methods Commonly Employed for Geotechnical Site Characterization,” Transportation Research Board Circular E-C130, 2008.
- [12] J. Meekes en B. Goes, „GeoPASS: a decision support system for selecting the optimal geophysical technique for shallow surveys,” *First Break*, vol. 23, nr. 6, pp. 7-12, 2005.
- [13] „<http://www.epa.gov/nerlesd1/cmb/GeophysicsWebsite/pages/decisionSupport.htm>,” [Online].
- [14] W. G. L. Telford en R. Sheriff, Applied geophysics, Cambridge University Press, 1990.
- [15] „http://www.epa.gov/esd/cmb/GeophysicsWebsite/pages/reference/methods/Surface_Geophysical_Methods/Seismic_Methods/Seismic_Reflection_Methods.htm,” [Online].
- [16] M. K. A. V. A. de Kleine, „Geo-impulse Pilot Julianakanaal - Geofysisch onderzoek kadestabiliteit en kanaalbodem,” Deltares Rapport 1209346-008-GEO-0001-v2, 2014.
- [17] C. B. Park, R. D. Miller en J. Zia, „Multichannel analysis of surface waves (MASW),” *Geophysics*, vol. 64, nr. 3, pp. 800-808, 1999.
- [18] C. B. Park en R. D. Miller, „Seismic characterization of wind turbine sites near Lawton, Oklahoma, by MASW method,” Kansas Geological Survey , 2005.
- [19] A. Ayolabi Elijah, F. Folorunso Adetayo en E. Jegede Olubunmi, „An application of 2D electrical resistivity tomography in geotechnical investigations of foundation defects: A case study,” *Journal of Geology and Mining Research Vol.4(6)* , pp. 142-151 , vol. 4, nr. 6, pp. 142-151, 2012.
- [20] A. Bolève, A. Revil, F. Janod, J. L. Mattiuzzo en J.-J. Fry, „Preferential fluid flow

pathways in embankment dams imaged by self-potential tomography," *Near Surface Geophysics*, vol. 7, nr. 5-6, pp. 447-462, 2009.

- [21] A. Kemna, A. Binley en L. Slater, „Crosshole IP imaging for engineering and environmental applications," *Geophysics*, vol. 69, nr. 1, pp. 97-107, 2004.
- [22] SAAone, Deltares, Fugro, „Frankenonderzoek A1-A6 - Pilot geofysische meetmethoden," Rapport Saaone-OGW-RAP-100001, 2014.
- [23] Milsom, *Field geophysics*, John Wiley and Sons, 2007.
- [24] S. Billings en D. Wright, „Interpretation of high-resolution low-altitude helicopter magnetometer surveys over sites contaminated with unexploded ordnance," *Journal of Applied Geophysics*, vol. 72, nr. 4, pp. 225-231, 2010.
- [25] M. Beres, M. Luetscher en R. Olivier, „Integration of ground-penetrating radar and microgravimetric methods to map shallow caves," *Journal of Applied Geophysics*, vol. 46, nr. 4, pp. 249-262, 2010.
- [26] Technical Committee 1, „Geotechnical & geophysical investigations for offshore and nearshore developments," International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2005.
- [27] CUR, „Geofysische technieken voor grondonderzoek," CUR rapport 182, 1998.
- [28] R. Fell, „Engineering Geophysics - A civil engineer's viewpoint," *Exploration geophysics*, vol. 21, nr. 1-2, pp. 25-31, 1990.
- [29] D. Butler, *Near-Surface Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, 2005.
- [30] V. van Hoegaerden, R. S. Westerhoff, J. H. Brouwer en M. C. van der Rijst, „Geotechnical site characterisation using surface waves, case studies from Belgium and the Netherlands," in *Proceedings Second International conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterisation*, Porto, 2004.
- [31] R. Westerhoff, V. van Hoegaerden, J. Brouwer en R. Rijkers, „ConsoliTest - Using Surface Waves for Estimating Shear-Wave Velocities in the Dutch Subsurface," in *Engineering Geology for Infrastructure Planning in Europe. Lecture Notes in Earth Sciences Volume 104*, Springer Berlin Heidelberg, 2004, pp. 368-376.

A Bijlage: Tabel met geotechnische risico's en geofysische technieken

Bron	Geotechnisch risico	Achterliggende oorzaak	Tabel uit CUR 247																	Aanvul- lend			Inzet geofysisch onderzoek kan worden overwogen of wordt sterk aanbevolen. In het laatste geval kan alleen bij gegronde redenen afgezien worden van geofysisch onderzoek.	Kansrijke inzet geofysisch onderzoek (nader te bepalen door experts)													Conussen			Algemeen: ++ Zeer geschikte techniek + Geschikte techniek op basis van expert kennis, met restricties zoals weergegeven in de tekst van het rapport. De toepasbaarheid dient per situatie gecheckt te worden met experts.
			8 Bouwrijp maken	9 Lijninfra	10 Kleine kunstwerken	11 Bruggen en viaducten	12 Overlaten	13 Sluizen	14 Tunnels en aquaducten	15 Polderconstructies	16 Bouwputten	17 Baggerwerken	18 Steigers	19 Kademuren	20 Leidingen	Stortplaatsen	Constructies op Zuid-Limburgse	Afdichtingen van kanaalbodems	Seismische reflectie (schuifgolf)	Mariene seismiek	Seismische refractie	MASW		downhole/crosshole seismiek	ERT	SP	IP	GPR	FDEM	Magnetometrie	Zwaartekracht	Boorgatmeten (meerdere technieken)	Seismische conus	ERT conus	Magneto-conus					
CUR C247	Eindzettingsgedrag ondergrond verkeerd ingeschat	Laagindeling en daaraan gekoppelde eigenschappen anders dan verwacht	x	x							x									overwegen	++		++	+	+	+			+			+	+							
	Omgevingsbeïnvloeding; deformaties van omliggende constructies	Laagindeling en daaraan gekoppelde eigenschappen anders dan verwacht	x	x							x									overwegen	++		++	+	+	+			+			+	+							
	Verstoringsen door trillingen en geluid	Laagindeling en daaraan gekoppelde eigenschappen anders dan verwacht	x	x	x	x	x	x	x		x		x	x						overwegen	++		++	+	+			++	+			+	+			Voornamelijk zand				
	Draagvermogen fundering op staal te laag	Cohesieve grondlaag onder fundering niet gesignaleerd				x	x			x		x								overwegen			+			++		+	+	+		+	+	+		Indien locatie bereikbaar is				
	Fundering op staal, zakking uit diepere grondlagen onderschat	Laagindeling en daaraan gekoppelde eigenschappen anders dan verwacht						x			x		x							overwegen	++		++	+	+	+			+	+		+	+	+						
	Fundering op palen draagkracht onvoldoende en/of zakking uit diepere lagen onderschat en/of horizontale gronddeformatie te groot	Laagindeling en daaraan gekoppelde eigenschappen anders dan verwacht								x		x		x	x					overwegen	++		+	+	+	+			+			+	+			Zowel ondiep als ook diepere lagen (Pleistoceen zand)				
	Vervorming grondkerende constructie te groot	Laagindeling en daaraan gekoppelde eigenschappen anders dan verwacht											x							overwegen	+		+			+		+				++				Bij stalen damwanden vallen elektrische en elektromagnetische technieken af				
	Grondkerende constructie, dynamische grondweerstand te hoog	Laagindeling en laageigenschappen anders dan verwacht								x										overwegen	+			+				+	+							Met betrekking tot grind, zand en zwerfkeien				

Bron	Geotechnisch risico	Achterliggende oorzaak	Tabel uit CUR 247																	Aanvullend	Inzet geofysisch onderzoek kan worden overwogen of wordt sterk aanbevolen. In het laatste geval kan alleen bij gegronde redenen afgezien worden van geofysisch onderzoek.	Kansrijke inzet geofysisch onderzoek (nader te bepalen door experts)															Conussen			Algemeen: ++ Zeer geschikte techniek + Geschikte techniek op basis van expert kennis, met restricties zoals weergegeven in de tekst van het rapport. De toepasbaarheid dient per situatie gecheckt te worden met experts.
			8 Bouwrijp maken	9 Lijninfra	10 Kleine kunstwerken	11 Bruggen en viaducten	12 Overlaten	13 Sluizen	14 Tunnels en aquaducten	15 Polderconstructies	16 Bouwputten	17 Baggerwerken	18 Steigers	19 Kademuren	20 Leidingen	Stortplaatsen	Constructies op Zuid-Limburgse	Afdichtingen van kanaalbodems	Seismische reflectie (schuifgolf)			Mariene seismiek	Seismische refractie	MASW	downhole/crosshole seismiek	ERT	SP	IP	GPR	FDEM	Magnetometrie	Zwaartekracht	Boorgatmeten (meerdere technieken)	Seismische conus	ERT conus	Magneto-conus				
CUR C247	Bemalingsdebiet te hoog	Aanwezigheid lokale zandlagen onvoldoende bekend					x			x			x					sterk aanbevolen	++		+			++	++	+	++	+					+	+		Bij stalen damwanden vallen elektrische en elektromagnetische technieken af				
	Grondbreuk	Laagindeling en daaraan gekoppelde eigenschappen anders dan verwacht								x			x					overwegen	+		+	+	+	+			+					+	+		Bij stalen damwanden vallen elektrische en elektromagnetische technieken af					
	Draagkracht ondergrond overschreden	Onjuiste inschatting sterkte grond of Laagindeling en laageigenschappen anders dan verwacht											x					overwegen	+			+								+	+				Met name voor vaststellen van laagindeling					
	Opbarsten bouwput	Afdichtende lagen onvoldoende bekend					x			x				x				sterk aanbevolen	+		+	+		++	+	++	+	+					+	+		Bij stalen damwanden vallen elektrische en elektromagnetische technieken af				
	Slib of veeninsluiting in onderwaterbetonvloer	Aanwezigheid veen of siltlagen ter diepte van vloer								x								overwegen		++							+									Bij stalen damwanden vallen elektromagnetische technieken af				
	Stabiliteitsverlies (talud, kade, grondkerende constructie)	Laagindeling en daaraan gekoppelde eigenschappen anders dan verwacht en sterkte overschat					x	x	x		x		x	x				sterk aanbevolen	+		+	+	+	+			+	+				+	+		Bij stalen damwanden vallen elektrische en elektromagnetische technieken af					
	Onderloopsheid, achterloopsheid, piping	Aanwezigheid lokale zandlagen onvoldoende bekend				x	x						x					sterk aanbevolen						++	++	++	+	+					+							
	Gronddrukken te hoog of te laag in tunnelwand of front	Laagindeling en daaraan gekoppelde eigenschappen anders dan verwacht						x										overwegen	++		++	+	+	+				+	+			+	+							

Bron	Geotechnisch risico	Achterliggende oorzaak	Tabel uit CUR 247																	Aanvul- lend	Inzet geofysisch onderzoek kan worden overwogen of wordt sterk aanbevolen. In het laatste geval kan alleen bij gegronde redenen afgezien worden van geofysisch onderzoek.	Kansrijke inzet geofysisch onderzoek (nader te bepalen door experts)															Conussen			Algemeen: ++ Zeer geschikte techniek + Geschikte techniek op basis van expert kennis, met restricties zoals weergegeven in de tekst van het rapport. De toepasbaarheid dient per situatie gecheckt te worden met experts.
			8 Bouwrijp maken	9 Lijninfra	10 Kleine kunstwerken	11 Bruggen en viaducten	12 Overlaten	13 Sluizen	14 Tunnels en aquaducten	15 Polderconstructies	16 Bouwputten	17 Baggerwerken	18 Steigers	19 Kademuren	20 Leidingen	Stortplaatsen	Constructies op Zuid-Limburgse Afdichtingen van kanaalbodems	Seismische reflectie (schuifgolf)	Mariene seismiek			Seismische refractie	MASW	downhole/crosshole seismiek	ERT	SP	IP	GPR	FDEM	Magnetometrie	Zwaartekracht	Boorgatmeten (meerdere technieken)	Seismische conus	ERT conus	Magneto-conus					
CUR 247	Waterdruk onder folie te hoog	Laagindeling en laageigenschappen anders dan verwacht							x													+	++	+	+	+					+									
	Zettingsvloeiing	Aanwezigheid lokale zandlagen onvoldoende bekend						x	x											+						+			+	+	+		Variaties binnen zandpaketten							
	Kleilaag te ondiep, waterdichtheid van kleilaag onvoldoende	Laagindeling en daaraan gekoppelde eigenschappen anders dan verwacht							x									+		+		++	+	++	+	+				+			Nadruk op dikte en continuïteit kleilagen							
	Volumegewicht grondlagen boven klei te laag	Laagindeling en daaraan gekoppelde eigenschappen anders dan verwacht							x									+		+	+				+				+											
	Injectielaag te ondiep of onvoldoende waterdicht (grout of chemische injectie)	Geohydrologie verkeerd ingeschat (grondwaterstroming) en Laagindeling en daaraan gekoppelde eigenschappen anders dan verwacht							x	x								+				++	+						+				Nadruk op grondwaterstroming							
	Baggerwerken: kwaliteit en/of hoeveelheid materiaal wingebied minder dan verwacht	Laagindeling en daaraan gekoppelde eigenschappen anders dan verwacht									x								++																					
	Draagvermogen palen te hoog of te laag, inklemming niet voldoende	Laagindeling en daaraan gekoppelde eigenschappen anders dan verwacht										x						++																						
	Onvoldoende rekening gehouden met ontgroning (onder water)	Laagindeling en daaraan gekoppelde eigenschappen anders dan verwacht										x						++																						
	Diverse grondrisico's gerelateerd aan microtunneling	Laagindeling en daaraan gekoppelde eigenschappen anders dan verwacht												x				+		+	+	+	+			+	+			+										

Bron	Geotechnisch risico	Achterliggende oorzaak	Tabel uit CUR 247																	Aanvullend	Inzet geofysisch onderzoek kan worden overwogen of wordt sterk aanbevolen. In het laatste geval kan alleen bij gegronde redenen afgezien worden van geofysisch onderzoek.	Kansrijke inzet geofysisch onderzoek (nader te bepalen door experts)													Conussen			Algemeen: ++ Zeer geschikte techniek + Geschikte techniek op basis van expert kennis, met restricties zoals weergegeven in de tekst van het rapport. De toepasbaarheid dient per situatie gecheckt te worden met experts.
			8 Bouwrijp maken	9 Lijninfra	10 Kleine kunstwerken	11 Bruggen en viaducten	12 Overlaten	13 Sluizen	14 Tunnels en aquaducten	15 Polderconstructies	16 Bouwputten	17 Baggerwerken	18 Steigers	19 Kademuren	20 Leidingen	Stortplaatsen	Constructies op Zuid-Limburgse	Afdichtingen van kanaalbodems	Seismische reflectie (schuifgolf)			Mariene seismiek	Seismische refractie	MASW	downhole/crosshole seismiek	ERT	SP	IP	GPR	FDEM	Magnetometrie	Zwaartekracht	Boorgatmeten (meerdere technieken)	Seismische conus	ERT conus	Magneto-conus		
CUR 247	Diverse grondrisico's gerelateerd aan HDD	Laagindeling en laageigenschappen anders dan verwacht													x						overwegen	+				+			+	+				+				Laagindeling met betrekking tot grind
	Degeneratie boorspoeling of smeervloeistof bij HDD of microtunneling	Zout / brak / zoet grondwater													x						overwegen						+					+						
aanvullend	Verschilzetting verkeerd ingeschat	Lithologie en stijfheidscontrasten in de ondergrond	x	x																	sterk aanbevolen	++			++	+	+	+					+	+	+		Zandbanen in het slappe lagen pakket	
	Verschilzetting verkeerd ingeschat bij wegverbredingen	Stijfheidscontrast tussen bestaande aardebaan en maagdelijk terrein, laagindeling			x																sterk aanbevolen	+			+	++	+					+	+					
	Verschilzetting verkeerd ingeschat	Gedempte sloten	x	x								x									overwegen					++		++	++									
	Verstoring grondwaterhuishouding	Drains in zandlagen gezet die in contact staan met eerste watervoerend pakket, laagindeling	x	x								x									overwegen	+		+	+		+											
	Drooglegging onvoldoende	Grondwaterstand in natuurlijke ondergrond of aardebaan te hoog	x	x								x									sterk aanbevolen								++							Grondwaterstand		
	Omgevingsbeïnvloeding; deformaties van kabels, leidingen, rioleringen	Onjuiste informatie over aanwezigheid en ligging	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x					sterk aanbevolen								++		+							
	Risico's gerelateerd aan stortplaats: verontreinigingen	Onvoldoende inzicht in opbouw en water-verdeling in de stort																	x		sterk aanbevolen	+			+		++		+	+	++			+	+			
	Risico's gerelateerd aan stortplaats: verschilzetting	Heterogeen stortmateriaal																		x	sterk aanbevolen	+			+	++	++		+	+	++			++		+		
	Aanwezigheid archeologische resten	(Kans op) Archeologische resten onvoldoende onderzocht	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x						sterk aanbevolen						++			++	++	++		++		+	+	

Bron	Geotechnisch risico	Achterliggende oorzaak	Tabel uit CUR 247																Aanvullend			Inzet geofysisch onderzoek kan worden overwogen of wordt sterk aanbevolen. In het laatste geval kan alleen bij gegronde redenen afgezien worden van geofysisch onderzoek.	Kansrijke inzet geofysisch onderzoek (nader te bepalen door experts)													Conussen			Algemeen: ++ Zeer geschikte techniek + Geschikte techniek op basis van expert kennis, met restricties zoals weergegeven in de tekst van het rapport. De toepasbaarheid dient per situatie gecheckt te worden met experts.
			8 Bouwrijp maken	9 Lijninfra	10 Kleine kunstwerken	11 Bruggen en viaducten	12 Overlaten	13 Sluizen	14 Tunnels en aquaducten	15 Polderconstructies	16 Bouwputten	17 Baggerwerken	18 Steigers	19 Kademuren	20 Leidingen	Stortplaatsen	Constructies op Zuid-Limburgse	Afdichtingen van kanaalbodems	Seismische reflectie (schuifgolf)	Mariene seismiek	Seismische refractie		MASW	downhole/crosshole seismiek	ERT	SP	IP	GPR	FDEM	Magnetometrie	Zwaartekracht	Boorgatmeten (meerdere technieken)	Seismische conus	ERT conus	Magneto-conus				
aanvullend	Aanwezigheid obstakels in ondergrond	Obstakels onvoldoende onderzocht	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				sterk aanbevolen									++	+	+					+					
	Afsluitende folie is lek	Beschadigingen in het folie							x	x								sterk aanbevolen						++	+														
	Verspreiding van veronreinigd percolaat naar de omgeving	Onvoldoende inzicht in opbouw en waterverdeling in de stortplaats													x			sterk aanbevolen						++		+	+	++				+							
	Integriteit van afdichtende voorzieningen op lange termijn is onvoldoende	Klink van stortmateriaal onvoldoende onderzocht													x			sterk aanbevolen						++	+	+		+											
	Draagkracht kalksteen verkeerd ingeschat	Laagindeling (overgang verweerd en niet verweerd of harde/zachte kalksteen) anders dan geschematiseerd			x	x	x	x		x	x	x	x			x		sterk aanbevolen	++		++						+			+									
	Draagkracht kalksteen verkeerd ingeschat	Discontinuïteiten (breuken/diaklazen) anders dan geschematiseerd			x	x	x	x		x	x	x	x			x		sterk aanbevolen	++					+			+			+									
	Draagkracht kalksteen verkeerd ingeschat	Oplossingsholten, al of niet met grond gevuld / ondiepe mijnactiviteiten niet gedetecteerd	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x			x		sterk aanbevolen	++					+			+			+									
	Bemalingsdebiet te hoog (kalksteen)	Verweringszone / discontinuïteiten / oplossingsholten anders dan geschematiseerd					x	x	x	x	x		x	x			x		sterk aanbevolen	++					+		+												
	Damwanden niet goed in te brengen	Hoeveelheid vuursteen in kalksteen onderschat									x						x		sterk aanbevolen	+		++												Om ligging van vuursteenlagen in beeld te brengen					
	Aanwezigheid van overige holtes	Holtes onvoldoende onderzocht																sterk aanbevolen	+								++	+		++									
	Lekkage uit kanalen en boezems	Afdichtende lagen onvoldoende bekend									x						x		sterk aanbevolen	++	++				+	+		+											