

---

# Handboek grondonderzoek grote projecten

Geologisch onderzoek voorafgaand aan grootschalig grond- of baggerwerk, gericht op de bodemgesteldheid en eventuele opbrengsten aan zand, grind en klei.

## Colofon

**Uitgave:**

Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Afdeling Grondstoffen  
Postbus 5044, 2600 GA DELFT.

**Eindredactie:**

M.W.I.M. van Heijst  
Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Afdeling Grondstoffen  
Postbus 5044, 2600 GA DELFT.  
Telefoon: 015-2518469 / 015-2518327

**Bijdragen van:**

S.H.L.L. Gruijters, J. Gunnink, M. de Kleine, R. Lantman  
Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO  
Postbus 80015, 3508TA Utrecht.



W.J. van der Hoef, H.L. Broens en H. Verkerk  
De Maaswerken, Postbus 25, 6200 MA Maastricht

**Speciale dank aan:**

M.J. van der Meulen, H.S. Pietersen en R.D. Hoogendoorn (RWS DWW),  
M. Hoogvliet (CSO)

*Bij het samenstellen van dit handboek is de grootst mogelijke zorgvuldigheid betracht. Het Rijk en de Nederlandse Organisatie voor Toegepast - Natuurwetenschappelijk Onderzoek TNO sluiten echter iedere aansprakelijkheid uit voor schade die uit het gebruik van in dit document opgenomen gegevens mocht voortvloeien.*

*De Dienst Weg- en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat (DWW) en degenen die aan deze publicatie hebben meegewerkt, hebben de in deze publicatie opgenomen gegevens zorgvuldig verzameld naar de laatste stand van wetenschap en techniek. Desondanks kunnen er onjuistheden in deze publicatie voorkomen. Het Rijk sluit, mede ten behoeve van degenen die aan deze publicatie hebben meegewerkt, iedere aansprakelijkheid uit voor schade die uit het gebruik van de hierin opgenomen gegevens mocht voortvloeien.*

**Bibliotheekgegevens**

*Handboek grondonderzoek grote projecten. Geologisch onderzoek voorafgaand aan grootschalig grond- of baggerwerk, gericht op de bodemgesteldheid en eventuele opbrengsten aan zand, grind en klei. / door M.W.I.M. van Heijst, S.H.L.L. Gruijters, J. Gunnink, M. de Kleine en R. Lantman - Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Delft: Publicatiereeks Grondstoffen 2002/26.*

DWW-2002-111  
ISBN 90-369-5515-7

## Inhoud

<b>Aanleiding en doelstelling van het handboek</b>	<b>4</b>
<b>1 Inleiding, samenvatting en leeswijzer</b>	<b>5</b>
1.1 Achtergrond: grondonderzoek bij grootschalige projecten	5
1.2 Samenvatting: leeswijzer	6
<b>2 Bestaande geologische kennis en beschikbare gegevens</b>	<b>11</b>
2.1 Inleiding	11
2.2 Lithostratigrafie en geologische kartering	11
2.3 Gebruik van bestaande boorgegevens	14
<b>3 De opzet van het onderzoek</b>	<b>15</b>
3.1 Inleiding	15
3.2 Soorten grondonderzoek	16
3.3 Kosten grondonderzoek	19
3.4 Keuze onderzoeksmethoden	21
<b>4 Opzet en uitvoering van het veldwerk</b>	<b>25</b>
4.1 Inleiding	25
4.2 De logistiek van een boorcampagne	25
4.3 Bodemonsters	27
4.4 Peilfilters	32
4.5 Plaatsbepaling	33
4.6 Afwerking boorgaten	33
4.7 Geofysisch onderzoek	34
4.8 Onderzoek op water	35
4.9 Overige aandachtspunten	36
<b>5 Databeheer</b>	<b>39</b>
5.1 Algemeen	39
5.2 Kenmerken van de data	39
5.3 Status van de data	40
<b>6 Interpretatie van veldgegevens</b>	<b>43</b>
6.1 Inleiding	43
6.2 Definities van grensvlakken	44
6.3 Gegevensverificatie	46
6.4 Klassieke steekproef	50
6.5 Analyse van de ruimtelijke correlatiestructuur	52
6.6 Interpolatie door middel van Kriging	55
6.7 Conditionele simulaties	57
6.8 Volumeberekening	60
<b>7 Risico-analyse van grondonderzoek</b>	<b>63</b>
7.1 Risico's bij uitvoering van het grondonderzoek	63
7.2 Risico's bij toepassing van grondonderzoekresultaten	65
<b>Bijlage A Beknpte geologie van Nederland</b>	<b>69</b>
<b>Bijlage B Boormethoden en sonderingen</b>	<b>83</b>
<b>Bijlage C Geofysische methoden</b>	<b>101</b>
<b>Bijlage D Bedrijfsvoeringsaspecten grondonderzoek</b>	<b>115</b>
<b>Literatuur</b>	<b>123</b>
<b>Index van trefwoorden</b>	<b>127</b>

## Aanleiding en doelstelling van het handboek

Dit handboek is tot stand gekomen naar aanleiding van grootschalig grondonderzoek dat is uitgevoerd binnen het rivierverruimingsproject De Maaswerken. Met dit project wordt beoogd om de afvoercapaciteit van de Maas te vergroten en de kans op overstromingen te verkleinen. Naast een verhoogde veiligheid behoren betere bevaarbaarheid en natuurontwikkeling tot de doelstellingen.

Gezien het voorkomen van grind en grof zand in het Maasdal lag een combinatie van rivierverruiming en de winning van oppervlaktedelfstoffen voor de hand. Het grondonderzoek binnen De Maaswerken heeft zich gericht op de vraag hoeveel oppervlaktedelfstoffen, met name beton-, metselzand en grind, zouden vrijkomen bij de uitvoering van een set rivierverruimende ingrepen. Daarnaast heeft het onderzoek de niet-vermarktbaar grond milieuhygiënisch geclassificeerd. In aard en omvang betekende dit (geologisch) onderzoek een primeur in Nederland. Het project werd uitgevoerd door de werkgroep Grondmanagement van de Maaswerken, die bestond uit medewerkers van specialistische diensten van Rijkswaterstaat (Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Bouwdienst), het Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen (TNO-NITG) en diverse adviesbureaus (o.a. Fugro, CSO, Witteveen en Bos).

Door de schaalgrootte van het project en de focus op bouwgrondstoffen heeft het onderzoek voor alle partijen belangrijke leermomenten gekend. Inmiddels is het onderzoek afgerond en werken de meeste mensen weer binnen hun eigen organisaties aan andere projecten. Dit handboek gaat in op de technisch-inhoudelijke en organisatorische aspecten van een dergelijk grootschalig grondonderzoek.

Doel van dit handboek is om de grote hoeveelheid kennis over de aanpak van zo'n groot grondonderzoek en de ervaringen die dit unieke project heeft opgeleverd vast te leggen tezamen met aanbevelingen voor vergelijkbaar onderzoek in de toekomst. Binnen Rijkswaterstaat kan bijvoorbeeld worden gedacht aan projecten als Ruimte voor Rivieren en voor de al lopende onderzoeken naar de productiemogelijkheden van industriezand op de Noordzee en het IJsselmeer.

Dit handboek beoogt geen analyse te zijn van het gehele project de Maaswerken. Het beperkt zich tot het vastleggen van de ervaringen en leermomenten met het uitvoeren van grondonderzoek binnen een dergelijk groot project. Wel wordt er aandacht besteed aan de manier waarop de resultaten van het grondonderzoek zo optimaal mogelijk binnen een projectorganisatie kunnen worden gebruikt. Met de term grondonderzoek wordt in dit handboek de karakterisering van de ondergrond in deelstromen van vermarktbaar en onvermarktbaar grond bedoeld. Het handboek richt zich daarmee specifiek op het grondonderzoek voor de inventarisatie van bouwgrondstoffen en niet op milieuhygiënisch bodemonderzoek. Tevens moet het boek gezien worden in zijn actuele context. Toekomstige grondonderzoek zal ongetwijfeld nieuwe inzichten geven die ter zijner tijd als aanvulling op dit boek kunnen worden gepubliceerd.

Delft, oktober 2002.

# 1 Inleiding, samenvatting en leeswijzer

## 1.1 Achtergrond: grondonderzoek bij grootschalige projecten

Rijkswaterstaat voert in principe in twee situaties grootschalig grondonderzoek uit of draagt hier aan bij:

- Voorafgaand aan infrastructurele of waterbouwkundige werken waarbij grote hoeveelheden grond vrijkomen waar een bestemming voor moet worden gezocht (b.v. bij de aanleg van baggerspeciedepots, de Hoge Snelheids Lijn, het Deltaplan Grote Rivieren, enz.).
- Ten behoeve van globale inventarisaties van voorkomens van bouwgrondstoffen (b.v. het huidige onderzoek naar de mogelijkheden voor winning van beton- en metselzand uit de Noordzee).

In beide gevallen gaat het om een indeling van de aangetroffen grondsoorten naar toepasbaarheid en/of vermarktbaarheid. Hierbij kunnen de volgende categorieën worden onderscheiden:

- oppervlaktedelfstoffen/bouwgrondstoffen, zoals bijvoorbeeld grind en grof zand, waaruit industriezanden geproduceerd kunnen worden;
- materialen die voor grondwerk kunnen en mogen worden toegepast (bijvoorbeeld grond of zand voor ophogingen, aanvullingen, etc.); en
- materiaal dat, hetzij om civieltechnische, hetzij om milieuhygiënische redenen, niet mag worden toegepast.

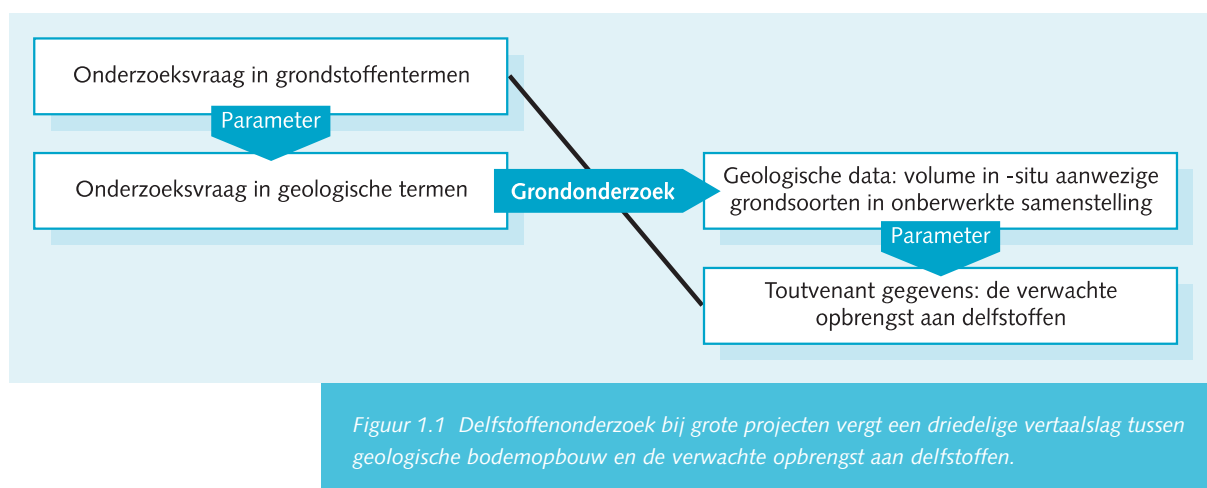
Dit handboek beperkt zich voornamelijk tot het bouwgrondstoffenaspect van grootschalig grondonderzoek. Een dergelijk onderzoek is in hoofdzaak een geologische exercitie, maar omvat een aantal aspecten die buiten het strikt geologische werkveld liggen. Een voorbeeld hiervan is de korrelgrootteverdeling die in meer detail zal moeten worden bepaald dan gebruikelijk is voor een geologische kartering.

Milieuhygiënisch onderzoek naar de ernst van chemische verontreiniging van de bodem vergt een andere aanpak, die niet in dit handboek wordt uitgewerkt. Bij grootschalige projecten zal vaak gelijktijdig onderzoek plaatsvinden naar bodemverontreiniging en de kwaliteit van de bouwgrondstoffen. Afstemming van beide onderzoeken is belangrijk, maar de twee vragen leiden tot afwijkend grondonderzoek met betrekking tot de methode en onderzoeksintensiteit.

Bij de totstandkoming van dit handboek is gebruik gemaakt van de kennis en ervaring opgedaan bij De Maaswerken. Hierdoor is het als naslagwerk met name geschikt voor toekomstig grondonderzoek als onderdeel van infrastructurele of waterbouwkundige werken. In mindere mate kan het gebruikt worden bij globale grondstoffeninventarisaties, de tweede categorie waar Rijkswaterstaat onderzoek verricht. Niettemin zal het ook voor deze laatste categorie bruikbare elementen bevatten.

De rode draad in het handboek behandelt drie 'vertaalslagen' (zie Figuur 1.1):

- de vertaling van het bouwgrondstoffenvraagstuk naar een geologisch vraagstuk: wat zijn de relevante parameters en hoe kunnen deze het beste worden gekarteerd?
- de vertaling van het geologische vraagstuk naar een gefaseerde onderzoeksopzet, waarbij de verwerving van gegevens gericht is op het optimaal (dus kostenefficiënt) benutten van voortschrijdend inzicht in de bodemopbouw tijdens het project.
- de vertaling van geologische resultaten in termen van de verwachte hoeveelheid bouwgrondstoffen.



Figuur 1.1 Delfstoffenonderzoek bij grote projecten vergt een driedelige vertaalslag tussen geologische bodemopbouw en de verwachte opbrengst aan delfstoffen.

## 1.2 Samenvatting: leeswijzer

Dit handboek bestaat uit een hoofdtekst waarin het verloop van het grondonderzoek chronologisch en thematisch wordt beschreven: van de planvorming tot en met de uiteindelijke rapportage. Feiten en kentallen uit het Maaswerkenproject, waarop dit boek is gebaseerd, zijn ter illustratie als inzet opgenomen in aparte kaders. Informatie die niet direct voortkomt uit De Maaswerken, maar wel van belang is voor een beter begrip over de geologie van Nederland, de toegepaste onderzoeksmethoden en bedrijfsvoering is aan het eind van het boek opgenomen in **vier Bijlagen**: Geologie van Nederland, Boormethoden, Geofysisch onderzoek en Bedrijfsvoering).

**Hoofdstuk 2** beschrijft de uitvoering van het **voortraject** van een grootschalig grondonderzoek. Hoe worden **bestaande gegevens** over de ondergrond gebruikt om een eerste model van de ondergrond te maken? Dit zogenaamde **startmodel** wordt vervolgens gebruikt om het feitelijke grondonderzoek op te zetten, waarin **nieuwe gegevens** verworven worden.

**Hoofdstuk 3** behandelt het traject dat nodig is om tot de **onderzoeksvraagstelling** te komen. Belangrijke beslissingen in die fase zijn: (1) de selectie van relevante, meetbare parameters, en (2) het vaststellen van het gewenste detail- en schaalniveau van het onderzoek. De kernvraag is hier waar en op welke manier nieuw onderzoek moet worden uitgevoerd, wat de vereiste gegevensdichtheden zijn, etc. Er worden in dit hoofdstuk met name aanbevelingen gedaan over de **fasering** van het onderzoek wat van belang is voor:

- de **structurering** van de aanzienlijke inspanning die met gegevensverwerving en interpretatie gemoeid is;
- het optimaal benutten van **voortschrijdend inzicht**;
- de juiste inzet van verschillende **onderzoekstechnieken**, waarbij een goede verhouding wordt gezocht tussen puntinformatie (boringen en sonderingen) en lijninformatie (zoals seismiek en geo-electriek). Boringen zijn primair gericht op materiaaleigenschappen; seismiek en geo-electriek op geometrieën en volumebepalingen. Sonderingen vormen een intermediaire categorie.

**Hoofdstuk 4** gaat in op de uitvoering en doorlooptijd van het veldwerk, inclusief de organisatorische aspecten hiervan, zoals aanbesteding, contractzaken en planning.

**Hoofdstuk 5** bespreekt de methodes van gegevensbeheer, met name het beheer van digitale gegevens.

In **Hoofdstuk 6** komt de interpretatie van de gegevens aan bod, met als eerste stap de gegevensverificatie om onbetrouwbare metingen uit te sluiten van verdere verwerking. Voor de interpretatie zelf worden de belangrijkste geostatistische methoden besproken, d.w.z. de statistische methoden die gebruikt kunnen worden om driedimensionale grondgegevens te verwerken.

Tenslotte biedt **Hoofdstuk 7** een analyse van de risico's van delfstoffenonderzoek voor een grootschalig project. Deze risico's zitten in 1) uitvoering en interpretatie van het grondonderzoek 2) het gebruik van de resultaten van het grondonderzoek. Het handboek besluit met een reeks aandachtspunten voor optimale inbedding van grondonderzoek binnen een groot project.

**Inzet 1: De Maaswerken als casus**

Na de hoge waterstanden in 1993 en 1995 heeft de overheid het Deltaplan Grote Rivieren vastgesteld. Hierin wordt uitgegaan van een overstromingskans voor de Maas van eens per 1250 per jaar. Om dit te bereiken is het noodzakelijk om grootschalige ingrepen in het Maasdal te realiseren. In april 1997 is de projectorganisatie De Maaswerken opgericht, waarin de deelprojecten Grensmaas, Zandmaas en Maasroute worden samengevoegd. De Maaswerken had vier doelstellingen:

- verhoging van de veiligheid, c.q. verbetering van bescherming tegen hoogwater;
- verbetering van de vaargeul;
- uitbreiding van natuurontwikkeling; en
- inventarisatie van de mogelijke grondstoffenwinning.

De Maaswerken is een samenwerkingsverband van de Ministeries van V&W en LNV en de provincie Limburg.

**Grensmaas**

Het deelproject Grensmaas beslaat het ongestuwde deel van de Maas tussen Borgharen en Linne over een totale lengte van ca. 45 km (Figuur 1.2). In een aangesloten gebied worden voornamelijk winterbedingrepen uitgevoerd om de rivier een natuurlijk karakter te geven.

**Zandmaas**

Het deelproject Zandmaas beslaat de ongestuwde Maas van Linne tot Hedel (ca. 150 km). Binnen dit traject worden zomerbedverdiepingen en winterbedingrepen uitgevoerd.

**Maasroute**

Het deelproject Maasroute heeft als doelstelling het verbeteren van de vaarroute van Ternaaien tot Weurt. De maatregelen bestaan voornamelijk uit aanpassingen aan bruggen en sluizen en het verbreden van het Julianakanaal.

**Grondverzet binnen de deelprojecten**

Door de aard van de voorgenomen ingrepen in de rivierbedding zou binnen het Maaswerkengebied veel grond moeten worden verzet, ca. 24 mln m<sup>3</sup> binnen het Zandmaasgedeelte en ca. 53 mln m<sup>3</sup> binnen het Grensmaasproject. Deze grond verschilt sterk in samenstelling en kwaliteit, zowel wat betreft de waarde als delfstof als de mate van milieuvervuiling. Om bij een dergelijk omvangrijk project als De Maaswerken vooraf een duidelijk beeld te krijgen van de te verzetten deelvolumina vermarktbare en onvermarktbare grond is grootschalig grondonderzoek noodzakelijk.



*Figuur 1.2* Overzicht van het projectgebied van de Maaswerken in Limburg en Oost-Brabant. De Maaswerken organisatie is opgericht na samenvoeging van de projecten Zandmaas en Maasroute. Later is daar het Grensmaasproject aan toegevoegd.



**Inzet 2: Definities bij de Maaswerken**

De definities van de grondstromen bij het project De Grensmaas zijn tot stand gekomen in overleg tussen de werkgroep Grondmanagement en gebruikers van de informatie. Bij De Maaswerken zijn de volgende definities gebruikt. (Figuur 1.3):

**Deklaag:** is de omschrijving van het ruwe materiaal inclusief alle fracties dat het toutvenant afdekt. De deklaag bestaat uit een mengsel dat voor minder dan 50% bestaat uit delen grover dan 2 mm (de grindfractie). De deklaag in het Grensmaasgebied bestaat voor een groot deel uit leem (verspoelde löss). De leem kan sterk- of zwakzandig zijn (maximaal 50% zand), bevat maximaal 25% lutum en bevat 75-100% silt. Minder vaak bestaat de deklaag uit siltige of zandige klei. Lokaal komen er ook zandpakketten voor, met name aan de basis van de deklaag. In de deklaag kunnen grindige lagen voorkomen die 0,75-1,00 m dik zijn. Deze lagen worden door hun geringe dikte en bijmenging van leem/klei niet als vermarktbaar beschouwd.

NB: Het betreft hier de projectdefinitie voor deklaag van De Maaswerken; de **algemene definitie van deklaag** is:

- 1 Algemene aanduiding voor afdekkende laag.
- 2 Een laag fijnkorrelig materiaal op een grovere grondsoort (e.g. klei en/of leem op zand, klei, leem en/of zand op grind).
- 3 Een laag onverhard materiaal of een verweringslaag op vast gesteente.
- 4 In de context van ontgroningen/mijnbouw: een laag die een (oppervlakte)delfstof afdekt.

**Toutvenant:** het pakket sediment dat voor meer dan 50% bestaat uit korrels met een fractie groter dan 2 mm en in het algemeen wordt afgedekt door de deklaag. De dikte van het toutvenant varieert van 2 meter tot meer dan 20 meter.

Er is binnen de Maaswerken bewust gekozen voor de term toutvenant en niet voor grind, omdat grind officieel alleen die fractie is met een korrelgrootte groter of gelijk aan 2 mm.

NB: het betreft hier de projectdefinitie voor toutvenant van De Maaswerken; de **gangbare definitie van toutvenant** is: opgebaggerd zand of grind, voordat hieruit door classificatie bouwgrondstoffen zijn verkregen (industriezanden, grind).

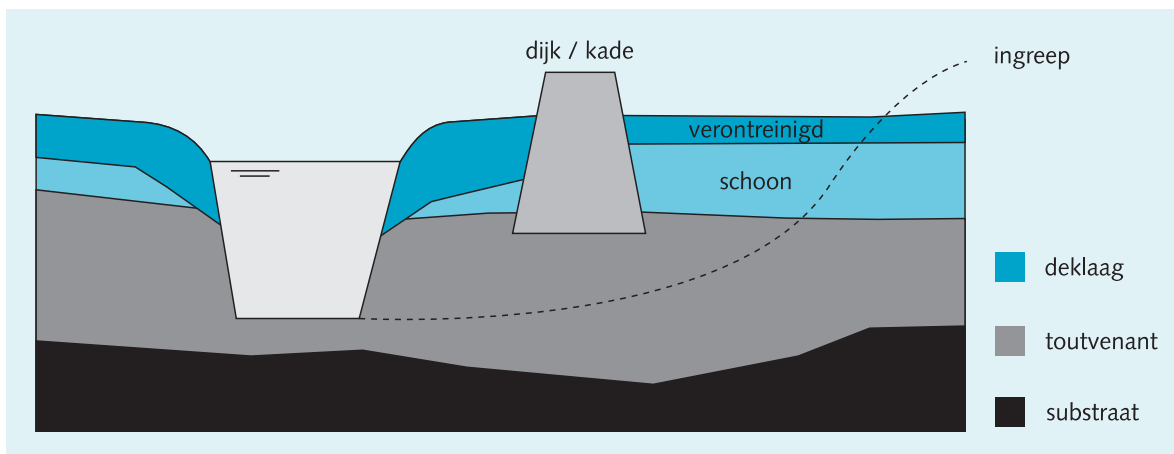
**Substraat:** het pakket direct onder het toutvenant.

**Stoorlaag:** lagen van beperkte omvang met een afwijkende samenstelling die in zijn geheel binnen het toutvenant vallen. De dikte van de stoorlaag varieert van 10 cm tot 2 meter en bestaat meestal uit klei, matig fijn tot matig grof zand of leem. Het is ook mogelijk dat er in het toutvenant inschakelingen voorkomen van grindige lagen; deze vallen echter niet onder de term stoorlaag.

**Grindige laag:** sublagen binnen de deklaag tot 1,0 m dikte die voor meer dan 50 % uit grind bestaan. Dunne grindlagen met een dikte van minder dan 5 cm worden grindsnoeren genoemd.

**Grensvlak deklaag:** het contact tussen deklaag en toutvenant.

**Grensvlak toutvenant:** het contact tussen toutvenant en substraat.



Figuur 1.3 Voorbeeld van te onderscheiden grensvlakken bij een rivierverschuivingsproject. De geplande ingreep is met een stippellijn aangegeven. De deklaag is onderverdeeld in een schoon en verontreinigd gedeelte. Het toutvenant dat zich binnen de ingreep bevindt kan als delfstof worden vermarkt bij de uitvoering van het project.



## 2 Bestaande geologische kennis en beschikbare gegevens

### 2.1 Inleiding

Geen enkel grondonderzoek hoeft 'van af de grond' opgebouwd te worden. Voor elk gebied in Nederland zijn er, in meer of mindere mate, geologische gegevens en inzichten beschikbaar. Deze bestaande geologische informatie kan bij de opzet van een grondonderzoek gebruikt worden om een eerste startmodel van de ondergrond op te stellen en op basis daarvan het feitelijke grondonderzoek op te zetten. De beschikbare gegevens bevatten vaak niet de specifieke informatie die nodig is voor grootschalig grondonderzoek zoals bedoeld in dit handboek (zie paragraaf 1.1). Zo is het voor strikt geologische studies voldoende om de korrelgrootteverdeling te karakteriseren met een mediaan, terwijl zeefkrommen vereist zijn voor een studie naar delfstoffen. Hoewel de beschikbare gegevens niet direct toepasbaar zijn op het probleem, zijn zij tegen relatief lage kosten te ontsluiten en bieden zij een goede eerste indruk van het onderzoeksgebied. Dit hoofdstuk gaat in op de wijze waarop dergelijke gegevens in een grondonderzoek gebruikt kunnen worden.

### 2.2 Lithostratigrafie en geologische kartering

Lithostratigrafie is de indeling van de bodem op basis van gesteentekennmerken. Het kan hierbij zowel gaan om harde gesteenten zoals kalksteen als onverharde sedimenten zoals grind, zand, klei, leem of veen. De lithostratigrafische eenheid is de formatie: een karteerbaar pakket waarvan zowel de ervan deel uitmakende gesteenten / grondsoorten als de begrenzingen zijn gedefinieerd op basis van in het veld waarneembare kenmerken. Formaties worden zo nodig onderverdeeld in laagpakketten en gegroepeerd in groepen. De namen van lithostratigrafische eenheden verwijzen over het algemeen naar de zogenaamde typelocatie: de plek waar zich de ontsluiting (Figuur 2.1) of boring (Figuur 2.2) bevindt waar de eenheid is gedefinieerd. Een overzicht van de in Nederland gehanteerde lithostratigrafie indeling is opgenomen in Bijlage A.



*Figuur 2.1 Voorbeeld van een rivierafzetting in het landschap. Geologen noemen een plek waar bodemlagen aan het oppervlak te bestuderen zijn een ontsluiting. Het potlood op de foto geeft een indruk van de schaal van de ontsluiting waarin in de Deklaag een afwisseling van fijn zand, grover zand en grind te zien is. Het betreft hier oude rivierterrasafzettingen, die in samenstelling van plaats tot plaats sterk kunnen variëren en daardoor redelijk veel onderzoeksinspanning vergen.*



*Figuur 2.2 Voorbeeld van het beeld dat een gestoken boring van de bodemlagen geeft. Op de foto is te zien dat de bovenste laag bestaat uit grof zand met grindige lagen. Daaronder zit fijnkorreliger sediment met dunne donkere kleilaagjes.*

Een geologische kartering is niets anders dan op een kaart aangeven welke formaties zich aan of nabij het maaiveld bevinden. Een geologische kaart bevat in de regel ook profielen die het verloop van formaties in de ondergrond tonen. Een geologische kaart vormt een goed uitgangspunt voor het opzetten van een groot-schalig grondonderzoek. Een beschrijving van de verschillende formaties (gaat het om zand, grind of klei etc.; is het pakket homogeen of juist sterk wisselend van samenstelling) geeft een eerste indicatie of de betreffende sedimenten mogelijk geschikt zijn als grondstof, maar zegt ook iets over de inspanning die nodig is om deze te karteren.

Tabel 2.1 geeft de in een grove lijnen de te verwachten bodemopbouw weer van de voor Nederland relevante afzettingen. De diverse typen afzettingen worden in Bijlage A uitgebreider behandeld met een korte uitleg over hun ontstaanswijze. Per type afzetting wordt kwalitatief aangegeven hoeveel onderzoek nodig is om deze in kaart te brengen en wordt vermeld of bij die afzettingen behoefte is aan puntinformatie (met boringen/sonderingen) en/of juist lijninformatie (met seismisch onderzoek). Rivierafzettingen bijvoorbeeld, vergen door hun inhomogeniteit (geulen, terrassen, oeverwallen e.d. redelijk wat onderzoeksinspanning (zie Figuur 2.1).

### Inzet 3. Rivierafzettingen bij de Grensmaas

De afzettingen die onder het winterbed van de Grensmaas liggen, zijn afgezet dicht bij het brongebied (de Ardennen) door een vlechtend riviersysteem (veel kleinere stromen in één bedding die steeds splitsen en weer samenkomen). De sedimenten behoren tot een enkele formatie. Het type rivier en de ligging ten opzichte van het brongebied heeft geresulteerd in een sedimentpakket dat voor 70-80% bestaat uit matig tot zeer grof grind, waarbij een deel van de grindfractie zelfs bestaat uit stenen, keien en blokken tot meer dan één meter groot. De rest van het materiaal bestaat voornamelijk uit grof zand met een paar procent silt. Kleivoorkomens zijn zeldzaam in deze afzettingen.

Verder naar het noorden en het westen worden de afzettingen van deze formatie geleidelijk fijner. Zand wordt het hoofdbestanddeel van het pakket; het aandeel klei wordt groter; de variatie binnen de formatie neemt toe; de dikte van het pakket wordt kleiner en er komen kleipluggen en kleilagen voor. Het aandeel stenen, keien en blokken is in de noordelijke voorkomens van deze formatie verwaarloosbaar. Deze verandering in korrelgrootte (grover in Zuid-Limburg, fijner naar de kust toe) is te verklaren uit het feit dat de sedimenten steeds op grotere afstand van het brongebied van de rivier zijn afgezet. Hoe dicht bij het brongebied, hoe grover het materiaal.

**Tabel 2.1: algemene beschrijving van de belangrijkste afzettingstypen in Nederland met een indicatie van de te verwachten onderzoeksinspanning.**

Type afzetting	Laterale verbreiding	Eigenschappen	Begrenzing	Onderzoeks- Inspanning	Type waarneming
Tertiaire* mariene afzettingen (in zee gevormd)	groot	homogeen van samenstelling, in dikte toenemend in NW richting	geleidelijk	gering, algemeen onderzoek	punt
Kwartaire* mariene afzettingen	groot	grote variatie in samenstelling, grote variatie in dikte	scherp	groot, gericht onderzoek	punt + lijn
Riviergeulafzettingen (zand en grind)	langgerekt, smal	grote variatie in samenstelling, grote variatie in dikte	scherp	groot, gericht onderzoek	punt + lijn
Rivierafzettingen (komgronden, rivierterrassen e.d.)	groot	O.h.a. fijnkorrelig.: klei en leem, vaak met inschakeling van veen. In de buurt van (voormalige) rivierlopen inschakelingen van fijn zand.	geleidelijk	aangepast	punt + lijn
Glacigene afzettingen (gerelateerd aan landijs)	waar landijs geweest is	grote variatie in samenstelling (ook keien), grote variatie in dikte	geleidelijk	groot, gericht onderzoek	punt
Gestuwde afzettingen (gerelateerd aan landijs)	geplooid	grote variatie in samenstelling, variabele dikte	scherp	Intensief	punt + lijn
Overige afzettingen:					
- löss	groot	homogeen van samenstelling, enige variatie in dikte	n.v.t.	gering	punt
- veen en bruinkool	lokaal	geringe variatie in samenstelling, grote variatie in dikte (0.5-25 m)	n.v.t.	aangepast	punt
- eolische afzettingen (door de wind gevormd)	groot	homogeen van samenstelling, enige variatie in dikte	geleidelijk	gering	punt

\* Geologisch systeem, of de corresponderende geologische periode; zie Bijlage A voor uitleg.

Een grote laterale variatie in de ondergrond kan naast door het type afzettingsmechanisme ook veroorzaakt worden door vervorming van de ondergrond (deformatie). Breukwerking zorgt in de ondergrond voor verschuiving van gesteentepakketten ten opzichte van elkaar. Aan het aardoppervlak kan breukwerking invloed hebben op afzettingsspatronen. Daarom is dan ook de eventuele aanwezigheid van breuken in het onderzoeksgebied één van de aandachtspunten bij de inventarisatie van bestaande gegevens. Vanuit de landelijke geologische kartering, een van de basistaken van TNO-NITG, is goede informatie beschikbaar over de ligging van breuken in Nederland.

### 2.3 Gebruik van bestaande boorgegevens

Het Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen, TNO-NITG beschikt over een digitaal archief van boorstaten dat DINO (Databank Informatie Nederlandse Ondergrond) heet. Momenteel zijn er ruim 400.000 boringen in opgeslagen en er wordt gewerkt aan een vergelijkbare database voor sonderingen. De database bevat zowel de feitelijke onderzoeksgegevens als een stratigrafische interpretatie (met een indeling in geologische formaties; zie Bijlage A). Deze geïnterpreteerde gegevens zijn de afgelopen jaren gebruikt voor het construeren van geologische profielen over heel Nederland. Hierdoor is een zeer goed beeld ontstaan van de ligging en de verbreiding van bijna alle formaties die in Nederland aangetroffen zijn. In Bijlage A is als voorbeeld een profiel over de Roerdalslenk weergegeven. Momenteel worden deze profielen samen met aanvullende onderzoeksgegevens en nieuwe interpretaties gecombineerd tot een landsdekkend grid waarin de ligging van de toppen van alle formaties ten opzichte van NAP is opgeslagen. Deze diepte-informatie wordt verder ontwikkeld tot een 3-D model van de Nederlandse ondergrond op het niveau van de formatie op schaal 1: 250.000. Dit model vormt een bruikbaar startmodel voor specifieke onderzoekslocaties.

Naast het maken van algemene ondergrondmodellen is het ook mogelijk om op projectbasis meer specifieke modellen te maken met de in DINO opgenomen kwantitatieve gegevens uit boorstaten, zoals bijvoorbeeld de combinatie van grondsoort en korrelgrootte. Een voorbeeld van toepassing van bestaande boorgegevens als voorverkenning voor eventueel veldonderzoek aan specifieke locaties is een opdracht van de projectorganisatie Ruimte voor Rivieren. In de planfase van de projecten Ruimte voor Bovenrivieren en Ruimte voor Benedenrivieren was behoefte aan inzicht in de globale samenstelling van de bodem van het projectgebied. In opdracht van de Directies Zuid Holland en Oost Nederland van Rijkswaterstaat heeft de Dienst Weg en Waterbouwkunde in samenwerking met TNO-NITG de bodem van het bovenrivierengebied en het benedenrivierengebied in kaart gebracht met een bureaustudie van bestaande boorgegevens. Het resultaat van de geologische inventarisatie is een kaarten-set die overzicht biedt over de reeds beschikbare boorgegevens. Taartpuntdiagrammen geven op de schaal van het projectgebied een indruk van de samenstelling van de ondergrond tot 40 meter onder maaiveld. Daarnaast is ook de diepteligging van het eerste zand en het eerste grove zand aangegeven. Deze ondergrondinformatie, die ook digitaal beschikbaar is, kan worden gebruikt bij de afweging van maatregelen en als basis voor eventueel locatiespecifiek vervolgonderzoek met veldwerk [Bosch et al., 2002; Gruijters et al., 2002].

Ook voor beleidsontwikkeling op het gebied van de nationale bouwgrondstoffen-voorziening zijn bestaande boorgegevens gebruikt om in te schatten welke geologische voorraden aan grove zanden en grind eventueel zouden kunnen worden aangesproken door diepere winning dan nu gebruikelijk toe te staan [Van Heijst en Modder, 2001; Dubelaar et al., 2002].



## 3 De opzet van het onderzoek

### 3.1 Inleiding

Wanneer er een eerste indruk verkregen is over de opbouw van de ondergrond (het startmodel opgesteld met bestaande gegevens, zie Hoofdstuk 2) en duidelijk is welke informatie het grondonderzoek precies moet opleveren, dan kunnen er specifieke onderzoeksvragen worden geformuleerd. Wanneer het gaat om een onderzoek gericht op de voorkomen van oppervlaktedelfstoffen, dan is de korrelgrootteverdeling de primair te karteren parameter. Bij de commerciële exploratie van een gebied door industriezand- en grindwinners, wordt op een potentiële winlocatie typisch circa één boring (tot 20 à 30 meter onder het maaiveld) per hectare gezet. Per meter boring wordt er een korrelgroottebepaling gedaan. De kosten hiervan bedragen, bij het huidige prijspeil (dat verderop worden behandeld) circa 5.000 euro/boring (exclusief uitwerking en overhead).

Het totale onderzoeksgebied voor de inventarisatie van de winmogelijkheden van beton- en metselzand op de Noordzee bedraagt circa 70.000 ha. Het oppervlak van het uiterwaardengebied van de Rijntakken, waar grondonderzoek wordt uitgevoerd in het kader van rivierverruimende maatregelen, is van een vergelijkbare orde van grootte. Het moge duidelijk zijn dat de bovenstaande onderzoeksdichtheid voor dergelijke gebieden niet haalbaar is en hooguit kan worden benaderd in deelgebieden die hiervoor om geologische of andere redenen in aanmerking komen. In het geval van de Maaswerken is het meest gedetailleerde grondonderzoek uitgevoerd op locaties waar (diepe) ingrepen voor delfstoffenwinning zijn voorzien.

#### Inzet 4: Onderzoeksvraag ontwerpfase Maaswerken

Voordat het Maaswerkenproject van start ging, is eerst de informatiebehoefte van de ondergrond algemeen in beeld gebracht [Blaquière, 1997]. Bij de aanvang van het grondonderzoek zelf en het veldwerk is de volgende onderzoeksvraag gedefinieerd:

Hoeveel m<sup>3</sup> toutvenant en deklaag komen er vrij bij de voorgenomen ingrepen in het Maasdal.

Bij deze onderzoeksvraag moesten de termen 'toutvenant' en 'deklaag' nog worden gedefinieerd, omdat deze bij aanvang nog niet eenduidig vastgesteld waren. Daarnaast was de vereiste betrouwbaarheid van het antwoord (en hierdoor de vereiste nauwkeurigheid van de te gebruiken onderzoekstechnieken) niet bekend. Een jaar na het begin van het onderzoek is de onderzoeksvraag als volgt bijgesteld: Wat is de verwachtingswaarde van het volume vrijkomend

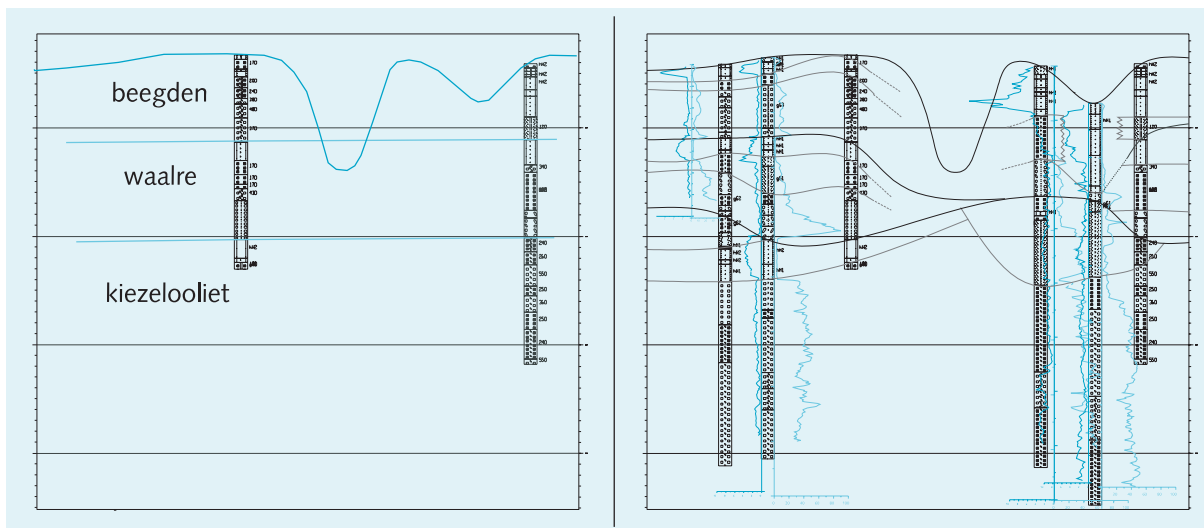
toutvenant en deklaag bij de voorgenomen ingrepen in het stroomgebied van de Maas. Daarnaast dient het 90% betrouwbaarheidsinterval van dit volume te worden gegeven, waarbij rekening is gehouden met de gebruikte meettechnieken (nauwkeurigheid) en de ruimtelijk dichtheid van het grondonderzoek (betrouwbaarheid). Het ontwerp van de ingrepen is bindend en derhalve geen variabele parameter.

Deze formulering is beter omdat:

- er geconcretiseerd is welk getal geproduceerd moet worden: de verwachtingswaarde;
- er duidelijk is aangegeven welke aspecten expliciet meegenomen moeten worden: nauwkeurigheid en betrouwbaarheid;
- specifiek aangegeven is welk betrouwbaarheidsniveau wenselijk is: 90% betrouwbaarheidsinterval.

In dit hoofdstuk wordt ingegaan welke onderzoeksmethoden er voor grondonderzoek beschikbaar zijn en op welke wijze deze kunnen worden ingezet. Hierbij wordt in algemene termen aandacht gegeven aan de onderzoeksfasering, waarbij – uitgaand van inzichten op basis van beschikbare gegevens (Hoofdstuk 2) – toegewerkt wordt naar gedetailleerd onderzoek. De mate van detail hangt samen met de randvoorwaarden die aan het grondonderzoek zijn meegegeven en dat is in dit handboek niet in algemene termen te omschrijven. Als het onderzoek specifiek gericht is op grondstoffen, dan moge duidelijk zijn dat bij fasering toegewerkt wordt naar maximale boorinspanning op die locaties waar (diepe) delfstofwinning gepleegd zal worden.

Als voorbeeld van het voortschrijdende inzicht dat nagestreefd wordt, laat het linker-profiel uit Figuur 3.1 een dwarsprofiel zien dat is opgesteld op basis van geïnterpreteerde boorgegevens die in DINO opgeslagen waren. Het rechterfiguur laat zien hoe dit profiel er uiteindelijk uit is komen te zien met aanvullende informatie (boringen en sonderingen) die uit veldonderzoek beschikbaar zijn gekomen.



Figuur 3.1 Voorbeeld van voortschrijdend inzicht in de bodemopbouw tijdens het verloop van het grondonderzoek. Het geologische profiel links is opgesteld op basis van twee bestaande boorstaten uit de DINO-database. In het rechter profiel zijn deze gegevens aangevuld met vier boringen en vier sonderingen. Het profiel links gaf voldoende indicatie van de relevante laagscheidingen en is gebruikt voor een inschatting van de haalbaarheid van een bepaalde ingreep en het bepalen van de onderzoeksstrategie. Het technische ontwerp van deze ingreep vergde een grotere mate van detail wat met de nieuwe boringen en sonderingen verkregen is.

## 3.2 Soorten grondonderzoek

### 3.2.1 Inleiding

In de beginfase van een grondonderzoek moet eerst onderzocht worden welke methodes van grondonderzoek relevant zijn voor dit specifieke project. In dit hoofdstuk worden meest gangbare technieken die in Nederland gebruikt worden (boringen, sonderingen en geofysisch onderzoek) kort behandeld in relatie tot de onderzoeksvraag en het te onderzoeken type afzettingen. De technieken worden uitgebreid beschreven in Bijlagen B en C. Rijkswaterstaat heeft zelf een inventarisatie gemaakt van de ervaringen opgedaan met verschillende grondonderzoekstechnieken [Kinneging, 1998; Vogel et al., 1998; Kruijt & Van Oord, 1999]. De nadruk in deze rapporten ligt specifiek bij inzetbaarheid, kosten, doorlooptijd en nauwkeurigheid van de methodes. Naast de eigen rapporten heeft Rijkswaterstaat ook bijgedragen aan de kennisontwikkeling bij andere instellingen [CUR, 1996]. Het BiesBos programma, in opdracht van het CUR ontwikkeld [CUR, 2000a], maakt, op basis van gegevens over een project en het gewenste type resultaten, een selectie van de meest geschikte geofysische methoden voor dat project.



### 3.2.2 Boringen

Boringen zijn ruwweg in twee categorieën onder te verdelen:

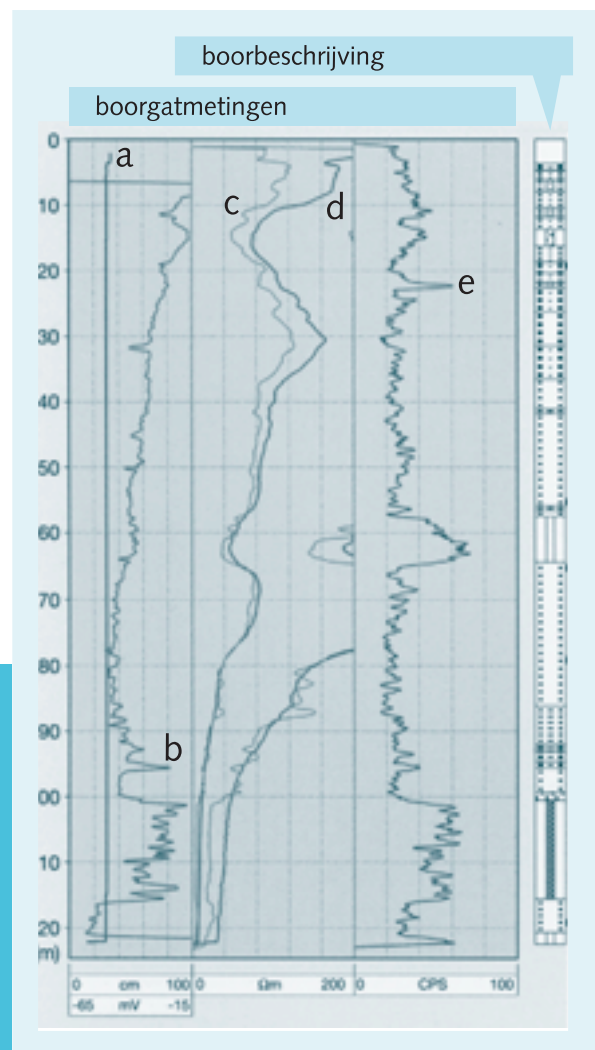
- *Gekernde boringen*, waarbij het bodemmateriaal (min of meer) ongestoord naar boven gebracht in een boorkern. Deze boorkernen geven een continu ongeroerd (d.w.z. niet verstoord) beeld van de ondergrond, maar zijn relatief duur in uitvoering.
- *Spoelboringen*, waarbij het bodemmateriaal door de boorvloeistof wordt losgemaakt en met de spoeling naar boven wordt gepompt. Het bodemonster wordt uit de spoeling gezeefd. Deze manier van boren werkt sneller dan gekernd boren, maar levert een geroerd (d.w.z. verstoord) beeld van de bodemlagen op.

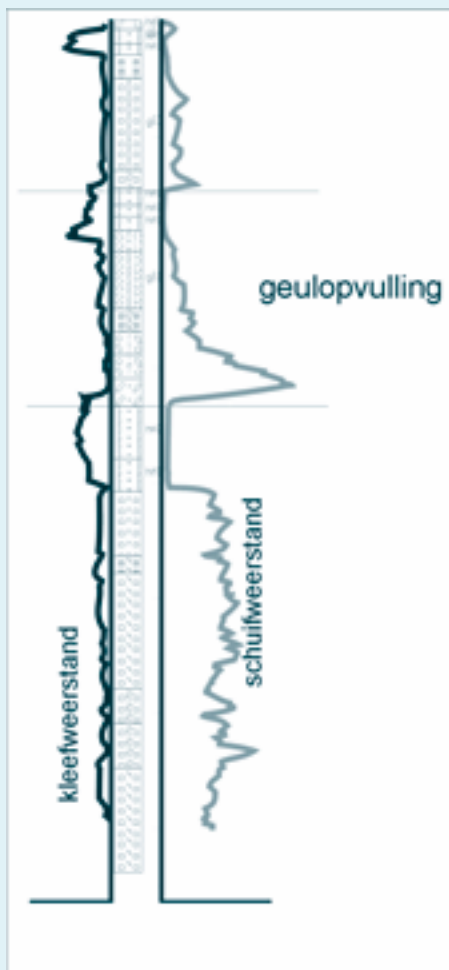
In Bijlage B worden de verschillende boormethodes uitgebreid beschreven, welke technieken mogelijk zijn, onder welke omstandigheden bepaalde methodes wel of niet inzetbaar zijn en wat de voor- en nadelen zijn ten opzichte van andere mogelijke technieken. De verschillende boortechnieken, de mogelijkheden, beperkingen en kosten staan samengevat in Tabel B.1 van die Bijlage B.

### 3.2.3 Boorgatmetingen

Naast de monsters uit het boorgat zijn de doorboorde lagen in het boorgat zelf ook te onderzoeken door middel van de zogenaamde boorgatmetingen waarbij een meetinstrument in het boorgat specifieke eigenschappen van de lagen meet. De mogelijkheden van boorgatmetingen en de diverse typen instrumenten worden uitgebreid behandeld in Bijlage C. Door bijvoorbeeld de hoeveelheid gamma-straling van de formatie in het boorgat te meten, kan het kleigehalte worden bepaald (zie Figuur 3.2e). Vooral bij diepere spoelboringen geeft deze meting belangrijke extra informatie voor een goede geologische interpretatie omdat de kleifraction dan vaak niet met de boorvloeistof mee naar boven komt.

*Figuur 3.2 Voorbeeld van de toegevoegde waarde van boorgatmetingen bij de boorbeschrijving van een spoelboring. De interpretatie van de opeenvolging van de lagen is gedaan op basis van het opgeboorde materiaal gecombineerd met verschillende typen boorgatmetingen: (a) caliper log: geeft de diameter van het boorgat weer; (b) spontaan potentiaal meting: geeft de "eigen" elektrische lading per grondlaag aan in milivolt. (c) short normal en (d) long normal log van de elektrische weerstand van de grondlagen in Ohm; (e) gamma ray log; de CPS schaal (counts per seconds) is een maat voor het kleigehalte van de afzettingen.*





### 3.2.4 Sonderingen

Voor funderingsonderzoek worden vaak sonderingen of Cone Penetration Tests (CPT) uitgevoerd (Figuur 3.3, zie ook zie Hoofdstuk 5 in Bijlage B). Dit is een efficiënte en goedkope techniek om bepaalde eigenschappen van de lagen in de ondergrond te meten. Bij een sondering wordt een kegel met een gestandaardiseerd oppervlak verticaal de bodem in geduwd. De schuifweerstand (bij het naar beneden duwen) en de kleefweerstand (bij het draaien) die de kegel ondervindt, is een maat voor de pakking van de korrels en het mechanisch gedrag, c.q. de geotechnische eigenschappen van het doorboorde materiaal.

*Figuur 3.3 Voorbeeld van een sondering waarin een geulopvulling zichtbaar is. Kenmerkend voor een geulopvulling is een grindige basis die naar boven toe geleidelijke overgaat van grofkorrelig (grof zand of grind) naar fijnkorrelig (leem of klei) materiaal. Bij het (neerwaarts) sonderen komt dit tot uiting in: (1) een toenemende schuifweerstand (rechterlijn) dat duidt op een toenemende korrelgrootte en een afnemende kleefweerstand (linkerlijn) die duidt op een afnemend kleigehalte.*

#### Inzet 5: Sonderingen bij de Grensmaas

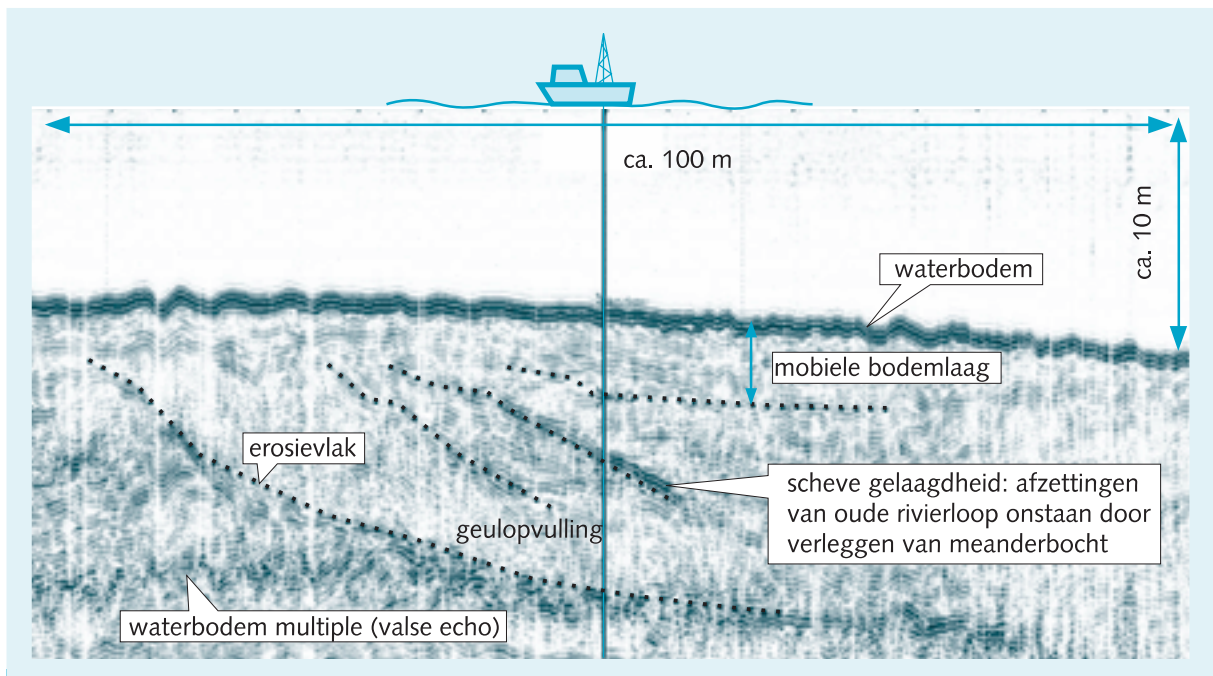
Bij de uitvoering van het bodemonderzoek in de Grensmaas bleken sonderingen nagenoeg onbruikbaar. Omdat de bodem voornamelijk opgebouwd is uit grove rivierafzettingen (voornamelijk grind), was het onmogelijk om correcte son-

deringen uit te voeren. De sonderingen bleven vaak steken of de sondeerconus werd door de grote weerstand van het grind onder een te grote hoek de grond in geduwd. Meer naar het noorden wordt dit fluviale pakket fijnkorreliger, waardoor sonderingen daar wel mogelijk zijn.

### 3.2.5 Geofysische methoden

De meest toegepaste geofysische methoden zijn gebaseerd op de reflectie van een uitgezonden akoestisch signaal (seismisch onderzoek) of elektromagnetisch signaal (onderzoek met grondradar, georadar, e.d.). Bijlage C geeft een overzicht van de verschillende geofysische methoden. Met behulp van deze techniek wordt langs een traject (een 'raai') een continu profiel van de ondergrond verkregen waarin reflectoren te zien zijn. De signalen worden gereflecteerd door abrupte overgangen tussen grond- of gesteentesoorten, zoals laagscheidingen of breuken, en door ontvangers geregistreerd. De reistijden van de gereflecteerde signalen worden geïnterpreteerd in

termen van de diepte van de reflector. Een model van de bodemopbouw kan nooit uitsluitend op basis van geofysische metingen gemaakt worden omdat er altijd boringen of sonderingen nodig om te bepalen welke reflector correspondeert met welke laagovergang (bijvoorbeeld van zand naar grind of van klei naar zand, zie Figuur 3.4). Seismische opnames zijn bij uitstek geschikt om de ligging van de laagscheidingen tussen puntwaarnemingen (boringen en sonderingen) over een heel onderzoeksgebied te kunnen vervolgen [Drenkelford, 1989].



Figuur 3.4 Voorbeeld van een seismisch profiel van een rivierbodem. Met behulp van de informatie uit de boring is afgeleid welk typen afzettingen in het seismisch profiel te zien zijn. Onder de mobiele laag, het huidige rivierbed van grof zand en grind zitten oudere structuren. Deze schuine lagen zijn hier geïnterpreteerd als de afzettingen die een meanderende geul hebben opgevuld (point bar afzetting). Met alleen de gegevens uit de boring, zonder inzicht in de ruimtelijke structuur van de afzettingen was het niet eenvoudig geweest om dit soort rivierafzettingen juist te interpreteren.

### 3.3 Kosten grondonderzoek

De kosten van een grondonderzoek zijn opgebouwd uit het veldwerk zelf, de verwerking en analyse van de gegevens, de interpretatie en de rapportage. Deze laatste twee posten zijn zeer variabel. Tabel 3.1 geeft een indicatie van de kosten van de diverse onderzoeksmethoden en de analyses van een veldwerk, gecombineerd met ervaringen opgedaan tijdens het project De Maaswerken. In algemene zin kan worden gesteld dat laagscheidingen het meest kostenefficiënt met behulp van geofysische methoden in beeld kunnen worden gebracht. Boringen of sonderingen zijn hierbij nodig om aan het verkregen beeld van de bodemopbouw materiaaleigenschappen toe te voegen (zie figuur 3.4).

**Inzet 6: Wat kostte het grondonderzoek binnen De Maaswerken?**

Binnen De Maaswerken is in totaal circa 5 miljoen euro aan grondonderzoek uitgegeven (zie Tabel 3.1). Gemiddeld bestond het delfstoffenteam van Grondmanagement bij De Maaswerken uit ca. 10 personen gedurende een periode van twee jaar. Uitgaande van een werkbezetting van gemiddeld vier dagen per week over een periode van 40 werkweken en een gemiddeld dagtarief van 550 euro, is er ca. 1,8 miljoen euro aan begeleiding en interpretatie van

het grondonderzoek uitgegeven.

Omgerekend naar tonnen winbaar zand en grind - ca. 65 mlj m<sup>3</sup>, ofwel ca. 130 mlj ton (35 mlj m<sup>3</sup> x 2,1 uit Grensmaas en 30 mlj m<sup>3</sup> x 1,9 uit Zandmaas) - is in totaal aan grondonderzoek plus interpretatie ongeveer 5 eurocent per ton uitgegeven. Om deze kosten in perspectief te plaatsen: uitgaande van een bruto opbrengst van circa 6 euro per ton bedraagt het aandeel van de kosten van het uitgevoerde onderzoek 0,8% van de kostprijs per ton grondstoffen.

**Tabel 3.1: overzicht van de kosten van het grondonderzoek voor De Maaswerken (Zandmaas en Grensmaas). De vermelde doorlooptijden en stuksprijzen zijn indicatief en deels gerelateerd aan projectgebonden factoren (geologische situatie, gevraagde vs. beschikbare onderzoekscapaciteit). Andere dieptes, aantallen en combinaties van metingen kunnen andere doorlooptijden en prijzen opleveren.**

Type onderzoek	Aantal	Prijs per stuk [EUR]	Gemiddelde diepte [m]	Doorlooptijd	Prijs per m [EUR]	Totaal [EUR]
<b>Boringen</b>						
Pulsboring op land	600		13	1 per 2 dagen	70-270*	1.800.000
Trifflip	1000		4	15 per dag	80-100	360.000
Pulsboring op water	200		7	2 per dag	250-300	340.000
Avegaar	450		3	5-7 per dag	130	160.000
Handboring	1500		4	8-10 per dag	25-50	205.000
<b>Geofysische sonderingen</b>						45.000
Geoelektriek op water	200 per km			10 km per dag	1	35.000
Geoelektriek op land	10			500 m per dag	4-7	45.000
Seismiek op water	600 per km			8 km per dag	1	500.000
Boorgatmeting	30		20	4 per dag	50	30.000
<b>Bijzondere verrichtingen</b>						
Dichtheidsproef	10	4500	n.v.t.	1 per 2 dagen		45.000
Grote diameter boring	10		10	1 per dag	500-600	45.000
<b>Laboratoriumonderzoek</b>						
Korrelgrootteverdeling	10,000	50-70		100 per week		680.000
<b>Overigen</b>						
Vervoer monsters				-		90.000
Maasplassenonderzoek				-		115.000
Multibeam				30 km per dag		90.000
Huur boot				-		140.000
Waterpassingen				10-12 per dag		30.000
Geotechnische proeven				enkele weken		40.000
<b>Totaal</b>						<b>4.975.000</b>

\* Hoge kosten door overvraagde markt (zie Inzet 7).

**Inzet 7: Fasering grondonderzoek Maaswerken**

Binnen de Maaswerken is het totale grondonderzoek uitgevoerd in een tijdsbestek van twee jaar. De boorcampagne is uitgevoerd in de voor de boormarkt drukste periode (tussen maart en november), binnen een zeer kort tijdsbestek

(6 maanden), met veertien boorstellingen en twee schepen. Op dat moment was bijna al het in Nederland aanwezige materieel ingezet voor De Maaswerken. Deze campagne heeft zo'n druk op de markt gelegd dat de prijs per meter boren in die tijd verdrievoudigd tot zelfs verviervoudigd is.

### 3.4 Keuze onderzoeksmethoden

Bij de keuze voor verschillende onderzoeksmethodieken (zie Tabel 3.2) is het volgende van belang:

- wat voor soort ingreep is gepland;
- hoe complex is de bodemopbouw (hoe goed is de bestaande kennis cq. startmodel);
- hoe nauwkeurig moeten de grensvlakken worden bepaald;
- welke eisen stellen de (later te gebruiken) interpolatiemethoden aan de veldgegevens;
- wat zijn de maximaal toelaatbare kosten voor het veldwerk;
- wat is de kwaliteit van het grondwater;
- hoe goed zijn de gebieden toegankelijk;
- waar vindt het onderzoek plaats: op land of op water.

**Tabel 3.2: factoren die bepalend zijn voor de keuze van het type grondonderzoek.**

	Boringen	Sonderingen	Geofysische meting	Combinatie
Type informatie	punt	punt	lijn	beide
Monsternamen mogelijk? (evt. aanvullende analyses)	ja	nee	nee	ja
Herkennen van laagseparatie	goed	goed	sterk contrast nodig	zeer goed
Oplossend vermogen bij grote laterale variaties in de bodemopbouw	minder	minder	goed	goed
Herkennen van verstoringen/discontinuïteiten	-	-	++	++
Representativiteit van de meting	lokaal	lokaal	globaal	beide

- niet geschikt, + wel geschikt, ++ uitermate geschikt

In eerste instantie moet de bestaande kennis van de opbouw van de ondergrond (het zgn. startmodel) op basis van bestaande gegevens (zie Hoofdstuk 2) meegenomen worden bij de opzet van het onderzoek. Wanneer het uiteindelijke doel is om een gebiedsdekkend beeld te krijgen, dan is het belangrijk dat er rekening gehouden wordt met de eisen die de uiteindelijk gebruikte interpolatiemethode stelt aan de gegevens (anticiperen van de onderzoeksopzet op de interpretatiemethoden).

Er is geen eenduidige richtlijn te geven voor 'de' onderzoeksintensiteit bij 'het' grondonderzoek. De eisen die aan een onderzoek gesteld worden, hangen af van de te verwachten variatie in de ondergrond en de gewenste nauwkeurigheid bij de beantwoording van de onderzoeksvraag [Van der Meer et al., 1998]. Daarnaast is het belangrijk of er gebruik gemaakt kan worden van gecombineerde onderzoekstechnieken. Omdat deze factoren per project verschillen, volgen hier slechts enkele algemene statistische handreikingen en worden enkele praktijkvoorbeelden van De Maaswerken

aangehaald. Hoofdstuk 6 gaat meer in detail in op de verschillende interpolatietechnieken; waarbij wordt toegelicht welke eisen er aan de gegevens gesteld worden bij de verschillende interpretatiemethoden.

Bij de interpretatie van de veldgegevens met een steekproef (zie paragraaf 6.4) is een minimale omvang van ca. 20 tot 30 waarnemingen nodig om het effect van extreme waarden binnen de steekproef weg te laten middelen. Een steekproefbenadering is mogelijk wanneer de interesse uitgaat naar een gemiddelde karakterisering van de ondergrond. Indien er, naast een uitspraak over de verwachtingswaarde, ook een betrouwbaarheidsinterval moet worden bepaald, kan de werkelijke variantie binnen de bemeten variabele geschat worden met de variantie uit de steekproef. Er moet, bij de vaststelling van de grenzen van de betrouwbaarheid van het gemiddelde, een extra onzekerheidsmarge worden ingebouwd door gebruik te maken van de Student-t verdeling. Deze extra onzekerheid is nog 5% bij een proef van 20 waarnemingen en slechts 3% bij 30 waarnemingen, ten opzichte van de situatie waarbij de variantie bekend is (aangenomen dat de bemeten parameter normaal verdeeld is). Voor het verantwoord toepassen van een steekproef is het noodzakelijk dat de waarnemingspunten willekeurig over het betreffende gebied verdeeld zijn. Het uitvoeren van een steekproefbenadering is geschikt voor een uniforme ondergrond.

Als het onderzoeksgebied dusdanig groot is dat het niet waarschijnlijk is dat de te bemeten parameter binnen een normale verdeling valt, dan kan ook gebruik gemaakt worden van een regressie-analyse. Deze analyse kan inzicht geven in mogelijke trends binnen het onderzoeksgebied. Voor een dergelijke analyse zijn ook minimaal 20 tot 30 waarnemingen raadzaam. Hoe lager het aantal waarnemingen, hoe minder betrouwbaar de uit te voeren analyse zal zijn.

Met name in de ontwerpfase van een project zal niet alleen gezocht worden naar een gemiddelde karakterisering, maar juist ook naar ruimtelijke informatie. Dan ligt het voor de hand om een geostatistische interpretatie van ruimtelijk verdeelde gegevens uit te voeren. De onderzoeksvraag concentreert zich in dat geval niet alleen op 'hoeveel' maar ook op 'waar'. Indien gebruik gemaakt wordt van geo-statistiek op variogrammen gebaseerd, zoals Kriging (paragraaf 6.6), dan dienen er minimaal 30 tot 50 meetpunten beschikbaar te zijn voor interpolatie. De gridpuntafstand wordt hierbij bepaald door de ruimtelijke samenhang in de te bemeten parameter (de 'range' of correlatielengte). Vaak is deze echter niet op voorhand bekend en zal op basis van het opgestelde startmodel van de ondergrond een schatting gemaakt moeten worden. Als startpunt is een gridafstand van 0,3 tot 0,5 maal de range een goed uitgangspunt. De range voor de ligging van laagscheidingen varieert vaak van 100 tot 1000 meter. Dit betekent dat het grondonderzoek een meetdichtheid moet hebben variërend van één boring per 10 ha tot vier boringen per ha. Voor het karteren van een klassieke zand/grindwinning is het uitgangspunt meestal een meetdichtheid van één boring per ha (gridpuntafstand van 100 meter).

Om er voor te zorgen dat de interpretaties een juiste weerspiegeling zijn van de werkelijke bodemopbouw, is het bij het gebruik van ruimtelijke interpolatietechnieken aan te raden om de onderzoeksintensiteit te koppelen aan de te verwachten ruimtelijke variatie. Deze ruimtelijke correlatiestructuur kan inzichtelijk worden gemaakt door binnen het meetpuntengrid willekeurig een tiental meetpunten in te plannen voor een variogram (zie paragraaf 6.5).



Het gebruik van geofysische technieken kan de onderzoeksdichtheid van puntgegevens beïnvloeden, omdat de data op relatief korte afstanden van elkaar op één (of enkele) raai(en) binnen het betreffende gebied worden verzameld. Voor een juiste ijking van deze technieken zijn boor- of sondeergegevens nodig. Bij een verdere interpretatie van de meetgegevens zal dan ook expliciet rekening gehouden moeten worden met het verschil in nauwkeurigheid van de gebruikte geofysische meetmethoden ten opzichte van de boor- of sondeergegevens.

**Inzet 8: Onderzoekopzet van de kleibergingen bij de Grensmaas (binnen De Maaswerken)**

Bij het bepalen van de onderzoeksinspanning is het type ingreep een belangrijk gegeven. Kleibergingen worden gebruikt om het deklaagmateriaal te bergen dat bij de voorgenomen ingrepen vrijkomt. Bij het graven van een kleiberging wordt aanwezig toutvenant ontgraven. De ligging van het contact tussen toutvenant en substraat is bij een kleiberging dan ook van cruciaal belang. Om extra informatie te krijgen over deze laagscheiding zijn, ter plaatse van de kleibergingen, geo-elektrische metingen uitgevoerd die met diepe mechanische boringen geïkt zijn. Ter plaatse van de stroomgeulverbreding en de weerdverlaging is de diepte van de ingreep gering en zal de kans klein zijn dat de basis van het toutvenant bereikt wordt. Voor ingrepen op die plek kan, voor het vaststellen van de basis van het toutvenant, worden volstaan met een lagere gegevensdichtheid dan nodig is op de plek van de kleibergingen. Mede op basis van deze overwegingen zijn de volgende uitgangspunten opgesteld.

**Onderzoeksdichtheid:**

- Er zijn voor de berekening van het grensvlak van de basis van de deklaag (contact deklaag – toutvenant) meer boringen nodig dan voor bepaling van de basis van het toutvenant (contact toutvenant – substraat), omdat de

basis van de deklaag grotere variaties vertoont dan de basis dan het toutvenant of de hoogte van het maaiveld.

- De totale boordichtheid (hand- en mechanische boringen) nodig voor het in kaart brengen van de deklaag is gemiddeld drie boringen per hectare;
- De totale boordichtheid van het in kaart brengen van de basis van het toutvenant ligt gemiddeld op één boring per 1,5 hectare. Voor de kleiberging is uitgegaan van een boordichtheid van circa één boring per hectare; ter plaatse van de stroomgeulverbreding en weerdverlaging is één boring per 2 hectare uitgevoerd.

**Type metingen:**

- Mechanische boringen geven de meest betrouwbare informatie voor de bepaling van de basis van de deklaag; geo-elektrische metingen kunnen aanvullende informatie verschaffen over de ligging van het grensvlak;
- De basis van het toutvenant kan in kaart gebracht worden met geo-elektrische metingen en mechanische puls-boringen. Handboringen zijn alleen geschikt voor het bepalen van de dikte van de deklaag.
- In totaal zijn er 2267 boorgegevens en 1029 puntgegevens uit geo-elektrische metingen beschikbaar gekomen voor de berekeningen. In Tabel 3.3 is een overzicht gegeven van de bij de Maaswerken gebruikte onderzoeksintensiteit, onderverdeeld naar type en ingreep.

**Tabel 3.3: metingen uitgevoerd bij het Grensmaasproject, onderverdeeld naar type en ingreep.**

Ingreep	Onbekend type boring*	Avegaar boring	Geo-elektrische meting	Handboring	Mechanische boring	Totaal
Weerdverlaging en stroomgeulverbreding	62	340	87	879	345	1713
Kleibergingen	6	140	942	219	276	1583
<b>Totaal</b>	<b>68</b>	<b>480</b>	<b>1029</b>	<b>1098</b>	<b>621</b>	<b>3296</b>

\* Archiefboringen die niet volledig gedocumenteerd zijn.

**Inzet 9: Onderzoeksopzet van het Zandmaasproject (binnen De Maaswerken)**

In eerste instantie was het Zandmaasproject voornamelijk gericht op verdieping en verbreding van het zomerbed. Het zwaartepunt van het grondonderzoek lag dan ook bij het zomerbed. Tijdens de eerste fase van het veldwerk zijn in het zomerbed om de 10 km drie pulsboringen uitgevoerd in secties dwars op de rivier. Dit onderzoek is later uitgebreid met per raai twee boringen op de oevers. In de periode van 1995 tot 1997 zijn in de as van de rivier 456 steek/pulsboringen gezet, later zijn 669 vibrocore en 65 steek/puls-

boringen gezet in dwarsraaien om de 400 meter. Ten slotte zijn op wat 'open' of ingewikkelde plekken nog eens 68 steek/pulsboringen gezet. Als aanvulling op de boorgegevens is ter plaatse van het gehele zomerbed (Maaskilometer 63 tot 220) in vijf raaien hoge-resolutie seismiek uitgevoerd, zodat een continu beeld ontstond van de verschillende laagovergangen in de ondergrond. In Tabel 3.4 is een samenvatting gegeven van het onderzoek dat uitgevoerd is binnen het Zandmaasproject. In de tabel staan ook de boringen die in het winterbed, ter plaatse van de hoogwatergeulen, uitgevoerd zijn.

**Tabel 3.4: metingen uitgevoerd bij het Zandmaasproject, per stuwpand en hoogwatergeul.**

Locatie	Ackermann steekboring	Steek/puls Boring	Vibrocore	Handboring	Totaal
Stuwpand Roermond	10	1	81	0	92
Stuwpand Belfeld	252	36	86	0	374
Stuwpand Sambeek	84	51	450	0	585
Stuwpand Grave	105	76	92	0	273
Stuwpand Lith	8	0	122	0	130
Hoogwatergeul Well/Ayen	38			248	286
Hoogwatergeul Ooijen	40			58	98
Hoogwatergeul Lomm	13			-	13
<b>Totaal</b>	<b>550</b>	<b>164</b>	<b>831</b>	<b>306</b>	<b>1851</b>

**Inzet 10: Nauwkeurigheid binnen De Maaswerken**

Voor een ingreep bij Itteren was de volgende onderzoeksvraag opgesteld: "Bepaal de gemiddelde ligging van de onderkant van de deklaag [meter t.o.v. NAP] ter plaatse van het winterbed". Om deze vraag te beantwoorden werd een aantal avegaarboringen gezet. De precisie waarmee, op een bepaalde plaats, de onderkant van de deklaag kan worden vastgesteld, is afhankelijk van de specificaties van de boormethode (een avegaarboring kan de scheiding tussen klei en grind vaststellen met een nauwkeurigheid van ca. 0,20 m) en de maaiveldhoogtemeting (het DGPS systeem heeft een precisie van ca. 0,10 m). De fout op de boorlocatie (het verschil tussen de gevonden laagscheiding en de werkelijke ligging) kon dan ook verwaarloosbaar klein genoemd worden.

De juistheid (precisie) van de gemeten waarde op één

bepaalde boorlocatie als schatter voor de gemiddelde ligging in het gehele gebied wordt bepaald door de natuurlijke variatie. Bij slechts één boring kan de fout aanzienlijk zijn. Het gemiddelde van een groot aantal waarnemingen in het gebied zal een veel betere schatting geven van de gemiddelde waarde van de onderkant van de deklaag. Indien het verloop van de onderkant van de deklaag wordt geschat met behulp van een interpolatiemethode, dan geeft deze, naast een ruimtelijk beeld van de verwachte ligging van de onderkant van de laag tevens de standaarddeviatie van de interpolatie. De standaard deviatie geeft de precisie weer, maar geeft niet de betrouwbaarheid van de interpolatiemethode. Een onafhankelijke kalibratie (bijvoorbeeld met een aantal waarnemingen die voor dit doel buiten de berekening zijn gehouden) geeft een indruk van de betrouwbaarheid van de interpolatie.



## 4 Opzet en uitvoering van het veldwerk

### 4.1 Inleiding

Bij de opzet van een veldwerk moeten er keuzes gemaakt worden ten aanzien van de inzet van de gekozen methoden, op basis van de lokale geologische situatie en de onderzoeksmogelijkheden ter plekke. Tal van logistieke aspecten bepalen uiteindelijk de doorlooptijd van de meetcampagne in het veld en de verwerking van gegevens tot aan de interpretatie. Dit hoofdstuk gaat in op de praktische uitvoeringsaspecten van het veldwerk zoals de bemonstering, de nazorg op de onderzoekslocaties (bijvoorbeeld de afdichting van boorgaten), aandachtspunten voor geofysisch onderzoek en de bijkomstigheden bij onderzoek op water. Tot slot worden de bedrijfsvoering en procedurele aspecten belicht.

### 4.2 De logistiek van een boorcampagne

Bij het plannen van de veldwerkzaamheden en de mogelijke inzet van bepaalde onderzoeksmethoden moet er rekening gehouden worden met de volgende zaken:

- **Bereikbaarheid:** de onderzoekslocaties (boorlocaties, raaien voor geofysische metingen) moeten bij voorkeur zonder extra voorzieningen met een vrachtauto bereikbaar zijn.
- **Werkruimte:** voor boor- en sondeerwerkzaamheden moet voldoende werkruimte aanwezig zijn die minimaal 5 x 10 meter groot is.
- **Bodemgesteldheid:** kennis over de ondergrond is noodzakelijk om een inschatting te kunnen maken welke typen boringen en sonderingen het meest geschikt zijn.
- **Lokale watersituatie:** er is water nodig voor de uitvoering van de boringen en afhankelijk van de onderzoeksplaats kunnen er verschillende eisen aan de kwaliteit van werk en afvalwater gesteld worden:
  - Voor machinale boringen moet er binnen redelijke afstand (100 m) werkwater beschikbaar zijn. Oppervlaktewater, mits niet vervuild, kan gebruikt worden.
  - Er mag in een grondwaterbeschermingsgebied alleen geboord worden met zuiver werkwater.
  - Het water dat uit het boorgat opgepompt wordt, dient (kosteloos) op korte afstand geloosd te kunnen worden op bijvoorbeeld oppervlaktewater of het maaiveld.
  - Als er in of langs dijken of kades geboord gaat worden, zijn voorzorgsmaatregelen noodzakelijk om het ontstaan van kwel/lekken te voorkomen. Dit dient in overleg met de uitvoerder en de beheerder van de dijk/kade afgestemd te worden. Hetzelfde geldt voor locaties waar sprake kan zijn van artesisch water. In dat geval moet er rekening gehouden worden met de mogelijkheid dat er in de ondergrond water kan voorkomen dat onder druk staat. Dit water kan bij het doorboren van de afsluitende laag met kracht uit het boorgat spuiten.
- **Bodemgebruik:** het is van belang informatie te hebben over de lokale infrastructuur, het bodemgebruik en het bodembeheer van het onderzoeksterrein. De volgende beperkingen kunnen zich voordoen:
  - Het is in veel gevallen niet toegestaan om veldwerk ter verrichten onder hoogspanningsleidingen.
  - Veldwerkzaamheden vinden vaak plaats in landelijke en moeilijk bereikbare gebieden. Niet alle wegen (bijvoorbeeld B-wegen), bruggen en viaducten zijn geschikt om zwaar en groot materieel te dragen. Overleg met de beheerder van de lokale infrastructuur kan nuttig zijn.
- **Seizoen:** weersinvloeden en zware regenval kunnen de werkzaamheden bemoeilijken (Inzet 11 geeft een voorbeeld van de mogelijke problemen, zie ook de Figuren 4.1 en 4.2).
- **Gewas- en structuurschade:** door locatiekeuze en de uitvoering van veldwerkzaamheden kan schade aan gewas en de structuur van de bodem beperkt worden gehouden.

**Inzet 11: Invloeden van weer, water of schade op veldwerkzaamheden**

Bij de planning van veldwerkzaamheden moet rekening gehouden worden met wisselende weersomstandigheden. Het is bijvoorbeeld niet mogelijk om boringen met werkwater uit te voeren tijdens periodes met vorst. Het onderzoeksterrein moet goed toegankelijk zijn voor het materieel. Na een (zeer) natte periode is het in een kleigebied niet mogelijk om zonder aanvullende maatregelen (zoals rijplaten of materieel op tracks) te boren of te sonderen (Figuur 4.1). Het veldonderzoek kan bemoeilijkt worden door de gewas-

sen die op het veld staan. De terreinen zijn meestal in eigendom van derden en er dient toestemming gevraagd te worden om het onderzoek uit te voeren.

Bij boringen in de winterbedding van een rivier moet rekening gehouden worden met mogelijk hoogwater. Bij De Maaswerken is het meerdere malen voorgekomen dat de handboringen niet gezet konden worden omdat de locatie nog onder water stond, of was het nodig om de boorwerkzaamheden af te breken om het boormaterieel te beschermen voor het opkomende water.



Figuur 4.1 Het seizoen kan de doorlooptijd van veldwerkzaamheden sterk beïnvloeden: een drassige bodem bemoeilijkt de verplaatsing van een boorstelling tussen de boorlocaties.

Bij veldwerkzaamheden moet niet alleen de doorlooptijd van de meting zelf gepland worden. Ook het opstellen van het materieel en het verplaatsen van de spullen van meetpunt tot meetpunt kan, afhankelijk van de methode en de lokale omstandigheden, veel tijd in beslag nemen. In sommige gevallen neemt mobilisatie/demobilisatie en opbouw/afbraak van het materieel meer tijd in beslag dan het uitvoeren van de veldmeting zelf.

Voor de uitvoering van het grondonderzoek zelf worden in de regel gespecialiseerde bedrijven ingezet. De bedrijfsmatige aspecten van het werken met dergelijke bedrijven staan in Bijlage D. De opdrachtgever is, naast het houden van toezicht, ook verantwoordelijk voor de volgende zaken:

- het aangeven van de boor- en sondeerlocaties in het terrein;
- het overleg met de wegbeheerder over eventuele verkeersvoorzieningen;

- het aanvragen van ontheffingen voor het betreden van bepaalde wegen (bijvoorbeeld fietspaden);
- het schoonhouden van de lokale wegen (denk aan klei afkomstig van boorwagens);
- het herstellen van verwijderde obstakels (zoals prikkeldraad).

De opdrachtnemer dient zorg te dragen voor de afvoer van overtollige opgeboorde grond en moet rekening houden met het feit dat dit materiaal in sommige gevallen als vervuilde grond beschouwd wordt.

### 4.3 Bodemonsters

#### 4.3.1 Bemonstering

De grondmonsters van een boorcampagne kunnen op verschillende manieren geanalyseerd worden. Welke analyse gebruikt wordt, is afhankelijk van de informatiebehoefte voor het ondergrondmodel en daarmee de te karakteriseren grondstromen. Voor de vraag of een afzetting bruikbaar is als oppervlaktedelfstof, is bijvoorbeeld de korrelgrootteverdeling belangrijk. Om de te verwachten zetting van de ondergrond te berekenen, zijn de zettingsconstanten van belang. Het benodigde aantal monsters en de te gebruiken analysetechnieken worden vastgelegd in een analysestrategie.

Als het niet noodzakelijk is om exact te weten waar iedere laag ligt en een mindere mate van detaillering voldoende is, kan, om de analysekosten te beperken, worden gekozen voor het samenstellen van mengmonsters. Het is ook mogelijk om pas in het laboratorium mengmonsters samen te stellen, zodat de individuele monsters beschikbaar zijn als er later toch behoefte is aan ruimtelijke of meer gedetailleerde informatie over de laageigenschappen. Als tijdens de boorcampagne wel zeer gedetailleerd bemonsterd is, kan in eerste instantie een beperkt aantal monsters geselecteerd worden voor analyse. De overige monsters kunnen geconditioneerd worden opgeslagen en zijn zo in de toekomst beschikbaar voor aanvullend onderzoek.

#### Inzet 12: Analysestrategie van het grondonderzoek bij De Maaswerken

Bij De Maaswerken is voor het milieuchemisch bodemonderzoek een richtlijn opgesteld [Scheffer, 2000] op basis van de bestaande regelgeving [NNI, 1999]. Voor de karakterisering van de delfstofvoorkomens is gekozen voor het bepalen van de korrelgrootteverdeling van de monsters. In principe is van elk monster een korrelgrootteverdeling bepaald. Bij sommige lagen zijn meerdere monsters samengevoegd tot één gemengd monster om zo de omvang van het monster te vergroten. Op basis van de cumulatieve zeefkrommes van de korrelgrootteverdelingen is later met het rekenprogramma opbrenGST [Gruijters & Zwang, 2001] het aandeel vermarktbaar grondstoffen (grind, betonzand etc.) bepaald.

#### De Grensmaas

Voor de analyse van monsters voor delfstoffenonderzoek zijn de volgende monsters bij de diepe mechanische boringen genomen:

- van de deklaag: gestoken monsters in PVC liners van 1 meter voor chemische analyses;
- van het toutvenant: (puls)monsters per traject van maximaal 1 meter of korter indien een laagovergang is aange-

troffen, voor korrelgrootteanalyses;

- van het substraat: gestoken monsters met behulp van liners en geroerde monsters genomen met de avegaar, voor analyse op doorlatendheid;

Daarnaast zijn met de avegaarboor geroerde monsters genomen van de basis van de deklaag en de top van het toutvenant en zijn er, op basis van lithologische kenmerken, steekmonsters van de deklaag genomen. Deze monsters zijn geanalyseerd op fysische parameters.

Voor de Grensmaas zijn er in totaal 1975 korrelgrootteverdelingen bepaald (ofwel 56 per 1 miljoen m<sup>3</sup> toutvenant). Daarnaast zijn er ter plaatse van de kleibergingen 24 doorlatendheidstesten uitgevoerd op het materiaal onder de geplande onderkant van de kleiberging (substraat).

#### De Zandmaas

De boringen in dit project zijn ook per diepte-interval van maximaal één meter bemonsterd (of korter bij laagovergangen). Van deze monsters zijn binnen het zomerbed in totaal 3410 korrelgrootteverdelingen bepaald. Verdeeld over 1454 boringen met een gemiddelde lengte van 5 à 6 meter, betekent dit gemiddeld één korrelgrootteverdeling per twee tot drie meter bemonsterd materiaal.

Voor een goede boorbeschrijving, dient er minimaal elke meter een monster genomen te worden. Treedt er binnen het een traject van één meter een laagsverandering op, dan moet tot die overgang bemonsterd worden en wordt er vanaf die diepte weer een nieuw monster volgens het overeengekomen traject samengesteld. Er is sprake van een laagsverandering als:

- de grondsoort verandert;
- de kleur van het monster duidelijk verandert;
- er een verandering te zien is in de bijmenging (bijv. een duidelijke toename van het grindpercentage of een duidelijke toename van het lutum percentage); en
- de korrelgrootte van het sediment verandert.

De monsters die tijdens een boring genomen worden zijn geroerd (verstoord) of ongeroerd (niet verstoord). Het opgeboorde materiaal wordt bij geroerde monsters uit de boorspoeling gezeefd en kan dan geanalyseerd worden. Ongeroerde monsters worden, afhankelijk van de methode in PVC liners, perspex liners of stalen steekbuis naar boven gehaald. De kunststof buizen worden dan in de lengterichting opengesneden om het monster te kunnen beschrijven. Bij perspex (doorzichtige) liners is het mogelijk om specifieke delen uit het monster te kiezen voor analyses waarbij het monster niet verstoord of opgesneden mag zijn (bijvoorbeeld om de doorlatendheid van specifieke lagen te kunnen meten). De methode die gebruik maakt van een stalen steekbuis is duur. Het monster moet uit de steekbuis gedrukt worden; het is niet mogelijk om de buis door te snijden zoals bij kunststof liners wel mogelijk is. Het voordeel van deze methode is echter dat de monsters zo min mogelijk verstoord zijn. Een uitgebreide beschrijving over boortechnieken en monstermethodes staat in Bijlage B.

Bij het bemonsteren met liners of steekbussen is het aan te bevelen om ook het geroerde monster van het gestoken traject te bewaren. Op basis van de beschrijving van dit monster kan dan bepaald worden of het ongeroerde equivalent geschikt is voor verdere analyse (bijvoorbeeld op basis van samenstelling of representativiteit voor het te onderzoeken pakket). Er kan zo een gefundeerde keuze gemaakt worden over de te gebruiken analysemethode (niet alle technieken zijn geschikt voor alle grondsoorten) en of het gestoken monster geopend moet worden voor verdere beschrijving. Monsterbussen voor monsternamen zijn in verschillende maten en soorten verkrijgbaar, variërend van dunwandig en dikwandig tot de zogenaamde 'split-spoon'. Ze zijn er met en zonder monstervanger, als 'liners' of met een speciale steekmond, en in diverse diameters en lengten. Elk type monsternamen heeft zijn eigen uitvoering, mogelijkheden, eisen en beperkingen. Het is daarom belangrijk om vooraf te bepalen welke monstertypen gewenst zijn (Figuur 4.2).





*Figuur 4.2 Monstername bij een puls boring, de puls wordt hiertoe buiten het boorgat gelegd.*

#### 4.3.2 Monstergrootte

Voor een korrelgrootte-onderzoek geldt de regel: “hoe grover het materiaal, hoe groter het monster”. De maximale korrelgrootte die binnen een korrelverdeling vastgesteld moet worden, is bepalend voor de grootte van het te nemen monster. De bestaande NEN-richtlijn [NNI, 1996] geeft echter alleen uitsluitel voor de minimale monstergrootte van grind (korrelgrootte  $\leq 63$  mm). De minimale monstergrootte voor de bepaling van monsters met stenen en keien (korrelgrootte  $> 63$  mm) is niet in deze norm opgenomen. Zandmonsters (korrelgrootte  $< 2$  mm) moeten minimaal 200 gram zijn, monsters met een maximale fractie van 63 mm moeten 40 kg groot zijn. In de praktijk wordt voor zand meestal een monster van circa 6 kg genomen. Als richtlijn geldt dat er voor het maken van een representatieve korrelverdeling van grind, waarin delen voorkomen met een maximale diameter van 63 mm, een monster nodig is van 200 kg. De vuistregel voor de monstergrootte luidt: monstergrootte = 2 x getal van nominale zeef in millimeters (de nominale zeef is een zeef die één maat groter is dan de maximaal te meten fractie, in dit voorbeeld is de nominale zeef 100 mm en is dus minimaal 200kg monster nodig). Het afleiden van het percentage stenen op basis van een monstergrootte dat kleiner is dan de NEN-norm kan leiden tot onnauwkeurigheid in de korrelgroottebepaling van het monster.

Naast het beschrijven van de boormonsters kunnen ze ook onderworpen worden aan in-situ testen, bijvoorbeeld de waterdoorlatendheid of Standaard Penetratie testen. Omdat het uitvoeren van diepe boringen relatief duur is, is het aan te bevelen om de monsters die niet direct nodig zijn voor analyse op te slaan. Later kunnen die dan gebruikt worden voor bijvoorbeeld aanvullend onderzoek naar parameters die in eerste

instantie niet geanalyseerd werden, detailstudies of her-analyse. Het is over het algemeen veel goedkoper om monsters tijdelijk op te slaan dan een boring opnieuw uit te voeren. Voor sommige analyses zijn echter verse monsters nodig.

#### Inzet 13: De maat van het monster

Bij De Maaswerken is uit praktische overweging gekozen voor een standaard monstergrootte van één emmer (ca. 25 kg). Het aantal monsters (ca. 2500), de transportafstand tot de laboratoria, de omstandigheden in het veld en de arbeid nodig voor het uitvoeren van één korrelgrootteverdeling, maakten het praktisch niet uitvoerbaar om grotere monsters te nemen. Gezien de samenstelling van de te onderzoeken lagen (matig grof tot zeer grof grind met stenen en keien) is één emmer eigenlijk te weinig. Tevens bleek dat de gebruikte 'standaard' boordiameter van 324 mm te klein was om alle aanwezige fracties op te kunnen boren. De opening van de gebruikte puls in deze diameter boorpijp is ongeveer 220 mm en grotere stenen en keien kunnen met deze methode niet opgeboord worden. Toch is voor de 324-mm boringen gekozen om het simpele feit dat er niet genoeg materieel in Nederland beschikbaar was om op de schaal van De Maaswerken een booronderzoek met grotere boordiameters te kunnen uitvoeren. Om toch een schatting te kunnen maken van de grove fractie (grof grind, stenen en groter) is besloten om ook

een aantal grote-diameter boringen uit te voeren, waarmee juist het aandeel van de meest grove fracties in het veld bepaald kan worden. Deze boringen hadden een diameter van 1000 mm en zelfs deze maat bleek tijdens de uitvoering niet groot genoeg om de grootste blokken op te boren. De methode maakt gebruik van een knijper die door zijn grote omvang de monsters op een niet-destructieve wijze op kon boren (zie Figuur B.6 in Bijlage B). Per meter werd zo ruim 2000 kilogram monster opgeboord. In het veld werden de grofste fracties afgezeefd. Het aandeel van de grofste fracties ten opzichte van de rest van het monster werd door weging bepaald (methodisch gezien gelijk aan het uitvoeren van een korrelgrootteanalyse in het laboratorium). Vervolgens werd het overgebleven fijne deel van de monsters volgens de standaard methode bemonsterd en gezeefd in het laboratorium. Op basis van deze resultaten was het mogelijk een factor te bepalen waarmee de gemiddelde korrelgrootteverdelingen, per ingreeplocatie gebaseerd op 'reguliere' boringen, gecorrigeerd konden worden.

#### 4.3.3 Beschrijving van de grondmonsters

Tijdens een boring wordt de bodemopbouw beschreven aan de hand van het monstermateriaal dat tijdens het boren vrijkomt. De wijze waarop dit materiaal beschreven dient te worden is genormeerd in de NEN 5104 [NNI, 1989]. De door TNO-NITG conform deze norm opgestelde standaard boorbeschrijvingsmethode [Bosch, 2000] geeft de mogelijkheid om meer gedetailleerde informatie in de beschrijving op te nemen, zodat boorbeschrijvingen bruikbaar zijn voor zowel geotechnische als geologische doelen. Het zakboekje "Grondsoorten en delfstoffen bij Naam" [Van der Meulen et al., 2002] biedt een handig overzicht van de indeling in grondsoorten en de gebruikte korrelgrootteklassen. Daarnaast zijn gangbare en meer locale namen voor diverse grondsoorten en bodemtypen opgenomen.

Monsterbeschrijving kan plaatsvinden in het veld. Het direct digitaal opslaan van de veldgegevens kan de efficiëntie verhogen (Figuur 4.3). De kwaliteit van boorbeschrijvingen die in het veld gemaakt zijn, is sterk afhankelijk van de omstandigheden (het weer, de planning, de dag van de week en de beschikbaarheid van hulpmiddelen voor het beschrijven). Het maken van goede foto's van de boormonsters, het uitvoeren indicatieve geotechnische tests en het beschrijven van steekmonsters is niet of slechts beperkt mogelijk in het veld. Handboringen zijn in het veld te beschrijven mits de beschrijver voldoende ervaring heeft met de te gebruiken norm en de voorkomende grondsoorten. Zeker bij grotere boorcampagnes is het sterk aan te bevelen de monsters van de diepere boringen onder geconditioneerde omstandigheden te laten beschrijven door een team van (gecertificeerde) boorbeschrijvers (Figuur 4.4).

De kwaliteit en bruikbaarheid van de boorbeschrijvingen worden op deze manier aanzienlijk verbeterd, zodat maximale informatie uit een boring gehaald kan worden. Het maken van foto's van de boormonsters is sterk aan te bevelen; ze zijn goed te gebruiken bij het interpreteren, vergelijken en controleren van de veldgegevens. Foto's dienen met behulp van een vaste opstelling hoekgetrouw genomen worden, zodat de schaling en kleurcodering op elke foto gelijk zijn.

Inzet 14: Gestandaardiseerd boorbeschrijvingsformulier voor derden

In het kader van De Maaswerken is een opzet gemaakt voor een standaard boorbeschrijvingsformulier zodat de diverse boorbedrijven de boringen volgens een zelfde systematiek beschrijven. De opzet van het formulier sluit aan bij de Standaard Boorbeschrijf Methode versie 5 van TNO-

NITG [Bosch, 2001]. Het gestandaardiseerde boorformulier vereenvoudigt ook de opname van de boringen in de digitale database DINO. Wat extra is, en geen deel uit maakt van de SBB-systematiek, is het beschrijven van archeologische aanwijzingen. Hiervoor is een extra kolom toegevoegd aan het boorformulier.



*Figuur 4.3 De veldcomputer voor de invoer van gegevens kan de verwerking van veldgegevens versnellen.*



*Figuur 4.4 Het beschrijven van de boorkernen uit het Maaswerken Project bij TNO-NITG.*



#### 4.3.4 Administratie en rapportage

Alle monsters die tijdens het veldwerk verzameld zijn, moeten worden voorzien van een unieke en systematische nummering. Bij De Maaswerken werd het NITG nummeringsysteem toegepast dat gebruikt wordt voor de landelijke archivering van boringen en sonderingen in de DINO database (Digitaal Informatiesysteem Nederlandse Ondergrond).

De veldwerkzaamheden dienen zowel door de opdrachtnemer als de opdrachtgever (de toezichthouders) gerapporteerd te worden. De rapportage van de opdrachtnemer moet de volgende onderwerpen bevatten:

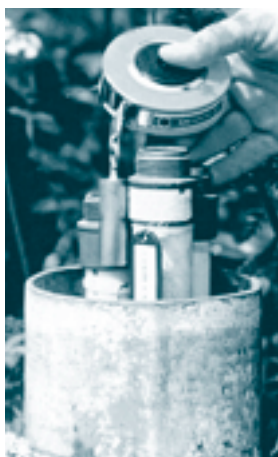
- de werkzaamheden die verricht zijn;
- de technieken die gebruikt zijn (bij boringen ook de maatvoeringen);
- de boorbeschrijvingen of monsterlijsten;
- de ruwe veldmetingen; en
- alle afwijkende situaties.

De rapportage van de opdrachtgever is gericht op de uiteindelijk administratieve afhandeling (zoals onder andere de facturering) en moet de volgende gegevens bevatten:

- de registratie van het uitgevoerde werk (bijvoorbeeld het aantal geboorde meters); en
- afwijkende situaties zoals het aantal wachturen of aanpassingen van geplande onderzoekslocaties.

#### 4.4 Peilfilters

Boorgaten worden voorzien van peilbuizen als het in het kader van het project noodzakelijk is om de grondwaterstand en/of de grondwaterkwaliteit voor (de nulmeting), tijdens en na het werk te controleren [Dufour, 1998]. Hierbij is het mogelijk om één of meerdere filters in het boorgat te plaatsen. Peilfilters worden meestal voor langere tijd geplaatst en daarom moeten de filters boven het maaiveld goed worden afgewerkt, bij voorkeur met metalen afsluitbare beschermkokers. Indien de filters gebruikt worden voor grondwaterkwaliteitsmetingen, dan moeten de filters en de beschermkokers aan specifieke eisen voldoen zodat de materialen van de peilbuis de waterkwaliteit niet beïnvloeden (Figuur 4.5).



*Figuur 4.5 De afwerking van een boorgat tot peilbuis om de grondwaterstand en waterkwaliteit te meten.*

De grondeigenaren moeten schriftelijk toestemming geven voor de plaatsing van de peilfilters en het betreden van het land om de peilfilters af te lezen. Bij plaatsing van een peilbuis moet rekening gehouden worden met het (actuele en toekomstige) gebruik van het land. Omdat veel peilfilters frequent moeten worden afgelezen, is het handig om ze op een goed bereikbare plek te plaatsen, zoals in wegbermen of op perceelsgrenzen.

Een groep van peilbuizen kan worden gebruikt als (onderdeel van) een grondwatermeetnet. In Nederland zijn verscheidende bestaande grondwatermeetnetten in gebruik [Van Bracht, 2001]. Indien een grote meetintensiteit gewenst is, bijvoorbeeld om een (bijna) continue beeld van de grondwaterschommelingen te verkrijgen, of als peilbuizen op een moeilijk bereikbare plaats staan, dan kunnen automatische opnamesystemen (de z.g. divers) gebruikt worden voor het meten van de grondwaterstand. Divers zijn meetcellen die de druk als functie van de tijd registreren. Divers moeten periodiek met handmetingen geïjkt te worden.



#### 4.5 Plaatsbepaling

Alle meetpunten en boorlocaties moeten zo nauwkeurig mogelijk ingemeten worden (x, y, z- coördinaten). Dit kan het beste gedaan worden nadat de meting of boring is uitgevoerd. Het komt namelijk vaak voor dat moet worden afgeweken van het geplande meetpunt. Bij het uitvoeren van continue (lijn)metingen, zoals bij veel geofysische technieken het geval is, moet de plaatsbepaling gelijk met de metingen uitgevoerd worden. Het inmeten van een onderzoekslocatie kan op verschillende manieren: met de traditionele landmeetapparatuur zoals de theodoliet of water-pastoestel, of (en daar gaat de voorkeur naar uit) met een Differentiated Global Positioning System (DGPS), die de plaats bepaald met behulp van satellieten en een hulpbaken.

#### 4.6 Afwerking boorgaten

Als een boring door slecht-waterdoorlatende lagen (klei, leem of veen) gaat, dan kan dat de grondwatersituatie verstoren. Ongeacht of in het boorgat filters moeten worden geplaatst, dienen bij het aanvullen van het boorgat de doorboorde slecht water-doorlatende (klei-, veen en leem)lagen afgedicht te worden. De wetgeving op dit punt verschilt per provincie en is nog niet overal geregeld. In het westen en noorden van het land is afdichting ook nodig om verzilting (het vermengen van zoet en zout grondwater) tegen te gaan. In principe moet het niveau van de kleiaanvulling zoveel mogelijk overeenkomen met het niveau van de doorboorde slecht doorlatende lagen. Afdichten kan gebeuren door middel van verschillende soorten zwelklei, bijvoorbeeld bentoniet of mikoliet.

Het bepalen welke delen van de boring precies afgedicht moet worden, kan gebeuren aan de hand van de grondmonsters en de boorbeschrijving. Hierbij moet een veilige marge in acht worden genomen, in verband met fouten in de monsternamen en het vaststellen van laaggrenzen. Bij straight-flush, counter-flush en luchtliftboringen is het raadzaam om een geofysische boorgatmeting te laten uitvoeren om aan de hand van deze meting de af te dichten trajecten vast te stellen.

De afwerking van boorgaten houdt, naast het afdichten van doorboorde klei- en leemlagen, ook in dat het gat opgevuld moet worden tot het niveau van het maaiveld. Doordat het boorgat aangevuld wordt met geroerde grond bestaat altijd het risico van nazakken. Enkele weken na afwerking van de boringen moeten de boorgaten gecontroleerd worden op nazakken. Indien er sprake is van sterk wisselende grondwaterstanden (met name in de buurt van rivieren) moeten de boorgaten frequenter gecontroleerd worden. Door het nazakken van boorgaten kunnen er relatief kleine, maar wel diepe kuilen ontstaan (zie inzet 15). Het risico van nazakken van boorgaten geldt voor machinale boringen en handboringen. De ervaring leert dat met name handboringen vaak niet goed aangevuld worden. Het is sterk aan te raden om de bovenste halve tot hele meter van het boorgat (afhankelijk van de lokale omstandigheden) aan te vullen met bijvoorbeeld bentoniet of zwelkokers (kartonnen kokers gevuld met zwelklei).

**Inzet 15: Het afdichten van boorgaten**

Door de sterk fluctuerende grondwaterstand langs de Maas, kan het gebeuren dat het materiaal waarmee de boorgaten zijn opgevuld, inklinkt of gaat zetten. Daardoor kunnen gaten ontstaan die gevaarlijk zijn voor mens en dier. Om gevaarlijke situaties te voorkomen zijn er extra controles in het veld geweest om nagezakte boorgaten aan te vullen. Dit resulteerde in een aanzienlijke extra kosten-

post. Er is toen besloten om in het vervolg de bovenste meter bij alle nog uit te voeren mechanische boringen op te vullen met bentoniet of met zwelkokers bij de handboringen. De meerkosten van deze werkzaamheden zijn veel lager dan de kosten van het naderhand controleren en aanvullen van boorgaten. Nazakking is echter niet in alle gevallen te voorkomen.

## 4.7 Geofysisch onderzoek

Bij het uitvoeren van geofysische veldwerk (zie Bijlage C) dient rekening gehouden te worden met de aanwezigheid van storende (niet natuurlijke) factoren in de bodem of op het maaiveld, zoals kabels en leidingen, hekwerk, grondwatervervuiling, etc. Deze fenomenen moeten zo compleet mogelijk in kaart gebracht worden, zodat ze tijdens het veldwerk vermeden kunnen worden. Bij de interpretatie van de metingen moet rekening gehouden worden met invloed van de aanwezige verstoringen.

Het uitvoeren van geofysische metingen is, in verhouding tot de interpretatie ervan, relatief simpel (Figuur 4.6). Omgevingsfactoren en de wijze waarop de metingen gedaan zijn, hebben veel invloed op het resultaat. Het is dan ook aan te bevelen om de meting en de interpretatie door hetzelfde team uit te laten voeren. Dat team moet dan wel over voldoende kennis van de lokale bodemopbouw beschikken om de meetgegevens goed te kunnen interpreteren. Om dit type indirecte metingen te interpreteren blijven ijkpunten (zoals boringen of sonderingen) altijd noodzakelijk (Figuur 3.4).



*Figuur 4.6 Geofysisch veldwerk: opname van een seismisch profiel. Hiertoe worden geluidsontvangers (geofoons) op regelmatige afstanden geplaatst. Met een geluidsbron of springlading worden trillingen uitgezonden. De opnemers registreren de terugkaatsing van geluidsgolven op verschillende laagovergangen in de ondergrond.*

#### 4.8 Onderzoek op water

Als bodemonderzoek vanaf het water uitgevoerd wordt, zijn enkele aanvullende factoren van belang. Er kan van alles in het water of op de bodem liggen, zoals kabels en leidingen (zinkers), fuiken, visnetten en kabels van veerponten. Omdat het uitvoeren van dit onderzoek hinderlijk kan zijn voor bijvoorbeeld de scheepvaart, moeten de werkzaamheden worden afgestemd met de beheerders van het water (rijkswaterstaat, waterpolitie, etc.). Onderzoek op water is anders dan op onderzoek op land: geofysisch onderzoek is goedkoper, boor- en sondeeronderzoek is juist duurder (Figuur 4.7). Er moet rekening gehouden worden met het feit dat het bovenste deel van de waterbodem meestal geen natuurlijk opbouw kent. Voor plaatsbepaling op water en het vaststellen van de hoogteligging van de bodem is speciale kennis nodig. Bijlage B besteedt apart aandacht aan onderzoek op water.



*Figuur 4.7 Boorponton met boorstelling voor grondonderzoek van waterbodems.*

## 4.9 Overige aandachtspunten

### 4.9.1 Bedrijfsvoering

Het uitvoeren van bodemonderzoek wordt in veel gevallen door externe bedrijven en of instellingen uitgevoerd. Bijlage D geeft een overzicht van de bedrijfsvoeringszaken die bij uitbesteding van veldwerk doorlopen worden, zoals:

1. de wijze van aanbesteding;
2. een inventarisatie van geschikte bedrijven;
3. het opstellen van een offerte-aanvraag en plan van aanpak;
4. het vergelijken van offertes;
5. het opstellen van contracten; en
6. de startbespreking met de uitvoerder.

### 4.9.2 Vergunningen, toestemming en schaderegelingen

In een aantal provincies is het verplicht om vooraf een vergunning aan te vragen voor bodemonderzoek. De factoren die meestal bepalend zijn voor het wel of niet krijgen van de vergunning, zijn de gebruikte boormethode, het onderzoeksgebied waar geboord gaat worden en de geplande boordiepte. De doorlooptermijn voor het verkrijgen van dit soort vergunningen varieert van enkele weken tot drie maanden. De regelgeving verschilt per provincie en voor grondwaterwinnings- en grondwaterbeschermingsgebieden gelden afwijkende regels. Daarnaast kunnen er aanvullende eisen aan het grondonderzoek gesteld worden die van invloed kunnen zijn op de uitvoering.

De verschillende toestemmingen die nodig zijn voor het uitvoeren van veldwerk, moeten van tevoren worden geregeld. Betreding van de percelen moet geregeld worden met de eigenaren en de gebruikers. De eigenaren en gebruikers van de betreffende percelen kunnen voor het bodemonderzoek begint schriftelijk op de hoogte worden gesteld van de geplande activiteiten. Zij moeten dan de mogelijkheid krijgen om wel of geen toestemming te verlenen voor het uitvoeren van bodemonderzoek op hun percelen. Kort voor de uitvoering kan persoonlijk contact worden gezocht voor het maken van definitieve afspraken. Gegevens betreffende de eigenaren en pachters zijn te verkrijgen bij het kadaster. Deze bestanden zijn echter lang niet altijd compleet bijgewerkt waardoor verificatie dan ook vaak noodzakelijk is. Bij het vragen van toestemming moet duidelijk aangegeven worden wanneer de boringen zullen plaatsvinden. Er moeten ook afspraken gemaakt worden met de eigenaar c.q. gebruiker van het perceel over het tijdelijk verwijderen van obstakels zoals hekken en prikkeldraad. Het veldonderzoek dient zodanig gepland te worden dat zoveel mogelijk voorkomen wordt om hetzelfde perceel meerdere malen (binnen een periode van maanden) te betreden.

Voor het uitvoeren van een veldonderzoek op terrein van derden moet een schaderegeling opgesteld worden. Het gaat hier met name om schade aan gewas, wegdek, bodemstructuur of omheining. De mogelijkheid voor schade/vergoeding dient gelijktijdig met het regelen van toestemming tot betreding van het perceel afgewikkeld te worden.

**Inzet 16: Het regelen van toestemming**

Het is erg belangrijk dat er op het juiste moment toestemming gevraagd wordt. Bij het project De Maaswerken is er te vroeg een brief naar alle inwoners van het Maasdal gestuurd dat er “mogelijk” op hun land geboord zou gaan worden. Hierdoor ontstond onnodig onrust. In werkelijkheid is slechts bij 10-20% van de landeigenaren geboord. Daarnaast bleek de tijd tussen eerste brief en de daadwerkelijke uitvoering te groot. De mensen waren de brief al

weer vergeten. Tevens was bij het aanschrijven van landeigenaren geen rekening gehouden met de gebruikers van de grond (de pachters) terwijl dat juist de mensen zijn die directe schade of hinder ondervinden van de werkzaamheden in het veld. Gezien de lange periode van de veldwerkzaamheden en de noodzaak om meerdere malen op dezelfde percelen terug te komen voor onderzoek, heeft iedereen die toen toestemming had geven voor bodemonderzoek rond de kerstdagen een kleine attentie gekregen.

**4.9.3 Kabels en leidingen**

Bij veldwerkzaamheden (op land en water) dient rekening gehouden te worden met de ligging van kabels en leidingen. Dit valt onder de werkzaamheden van de opdrachtnemer, die verplicht is om grondwerkzaamheden, inclusief machinaal boren en sonderen, vooraf te melden bij het KLIC (Kabels en Leidingen Informatie Centrum) zodat het risico van beschadiging aan kabels en leidingen door veldwerkzaamheden zo minimaal mogelijk is. De opdrachtgever blijft echter eindverantwoordelijk bij eventuele schade. Bij sommige onderzoekstechnieken (bijvoorbeeld geo-elektrische metingen) hebben kabels en leidingen een storende invloed op het resultaat van de meting. Bij dergelijke onderzoekstechnieken is het wenselijk om ruim voor de uitvoeringsfase van het project de ligging van kabels en leidingen inzichtelijk te hebben (meer informatie staat op [www.klic.nl](http://www.klic.nl)).

Werkzaamheden plannen langs bestaande wegen heeft als voordeel een goede bereikbaarheid gedurende het gehele jaar. Het nadeel in veel gevallen is dat er vaak kabels en leidingen op hetzelfde traject aanwezig zijn (bijvoorbeeld voor lantaarnpalen). Het is niet toegestaan om zondermeer met zwaar materieel over alle in de bodem liggende leidingen te rijden (bijvoorbeeld hoofdleidingen van de Gasunie). Aanvullende maatregelen kunnen dan noodzakelijk zijn (zoals rijplaten/draglineschotten). Het soort extra maatregelen is sterk afhankelijk van de lokale omstandigheden (bodemopbouw, diepte waarop de leidingen liggen).



## 5 Databeheer

### 5.1 Algemeen

Het gebruik van een digitale database voor de opslag van veldgegevens maakt die gegevens tijdens de fase van rapportage en interpretatie beter toegankelijk. Een digitale database maakt het tevens mogelijk om bij de interpretatie van de gegevens gebruik te maken van Geografische Informatie Systemen (GIS). Met GIS kan men relatief snel een overzicht krijgen van de ruimtelijke verspreiding van de gegevens in een bepaald gebied en deze omzetten in kaartmateriaal [Burrough & McDonnel, 1998]. Daarnaast is GIS handig bij het archiveren en ontsluiten van aanvullende informatie zoals bijvoorbeeld kadastrale gegevens, etc. Bij grondonderzoek binnen grote infrastructurele projecten komen er veel gegevens beschikbaar, die vaak door verschillende partijen gebruikt moeten worden. Goed databeheer is hierbij onontbeerlijk om te voorkomen dat er problemen ontstaan met fout opgeslagen data, het gebruik van verschillende versies van datasets en het gebruik van niet-gevalideerde data. Bij databeheer moeten twee aspecten goed vastgelegd worden: de kenmerken van de data en de status van de data.

### 5.2 Kenmerken van de data

Om een goede databorging mogelijk te maken, moet eerst worden vastgelegd wat voor data beheerd moet worden, zoals:

- analoog of digitaal gegevens;
- thematische of alfanumerieke data;
- punt-, lijn- of gridgegevens.

Voor elk type moet worden vastgesteld in welk bestandsformaat de data moeten worden aangeleverd. Bij de beschrijving van het formaat moet als eerst een softwarepakket gekozen worden (toegankelijkheid, uitwisselbaarheid, mate van standaardisatie). Als dat bekend is, moet vastgesteld worden aan welke definities de bestanden moeten voldoen. Voor een databestand binnen een spreadsheetomgeving betekent dat bijvoorbeeld dat er eenduidige afspraken moet zijn welke gegevens in welke kolom staan, wat de naam van die kolom is en tenslotte wat het format van de gegevens in de verschillende kolommen is.

Naast het formaat van 'bestaande' datapunten moet ook bekend zijn hoe wordt omgegaan met datapunten waar een bepaald attribuut ontbreekt. Het komt voor dat bij een meting niet alle datapunten zijn gelukt. Als deze meting helemaal niet opgenomen wordt in het gegevensbestand, dan wordt er informatie weggegooid. Het kan zeer belangrijk zijn om op een gegeven moment inzicht te krijgen waar en waarom een meting niet is voltooid, al was het alleen maar om te controleren of de opdrachtnemer (die is ingehuurd voor de data-acquisitie) aan zijn verplichtingen heeft voldaan. Maar ook bijvoorbeeld informatie over het niet bereiken van een relevante laagscheiding binnen een boring geeft meer informatie dan het weglaten van deze boring bij het karteren van deze laaggrens.

Inzet 17 Verschillende systemen voor de opslag van vergelijkbare gegevens

Binnen De Maaswerken is besloten om boorgegevens met betrekking tot milieudata in NAZCA op te slaan en boorgegevens van andere boringen in DINO. Beide systemen zijn gebaseerd op een ORACLE database. Toch bleken beide

systemen niet direct onderling uitwisselbaar, terwijl informatie uit beide bestanden nodig was voor het opzetten van een ondergrondmodel. Het bracht extra inspanningen met zich mee om gegevens uit beide databases te kunnen combineren.

### 5.3 Status van de data

Bij het verzamelen en beheren van data zijn verschillende stadia te onderscheiden:

- data-acquisitie door de dataleverancier;
- databorging, verzorgd door de databeheerder; en
- gebruik van de data, door de gebruikers.

Bij bodemonderzoek bestaat data-acquisitie uit het inwinnen van veldgegevens analyses. Die data worden als concept aangeleverd. Daarna moeten de gegevens gecontroleerd worden op hun juistheid. De dataleverancier is belast met deze taak en controleert bijvoorbeeld de positie van de boring, het niveau t.o.v. NAP en het juiste format van de gegevens. Pas na deze controle krijgen de data een conceptstatus.

De databeheerder voert de data definitief in de database en verzorgt de kwaliteitsborging van de database. Alleen de databeheerder kan mutaties aanbrengen binnen de database. Voor het project moet gekozen worden voor een eigen systeem óf aansluiting bij een bestaande database. Het voordeel van aansluiting bij een bestaande database is dat de toegankelijkheid en het beheer ook na het beëindigen van het project gewaarborgd is. Daarnaast is het ook belangrijk dat het beheer van de gebruikte data na het beëindigen van het (grond)onderzoek geregeld is om de beschikbaarheid van de data te waarborgen tijdens de verdere uitvoering van het project en mogelijk voor een bepaalde periode daarna. Dit houdt in dat er een beheerder moet komen en dat er duidelijke afspraken nodig zijn over de beheerstermijn, de bereikbaarheid van de beheerder, de wijze van ontsluiting van de data en de mate van vertrouwelijkheid van de data.

De datagebruiker 'leent' de data uit de database. De verwerking van deze data in een interpretatie gebeurt buiten de database. Met andere woorden de gebruiker zelf is belast met het goed archiveren van zijn 'interpretatie' database. Hierbij moet de set van keuzes die uiteindelijk hebben geleid tot de definitieve interpretatie goed worden gedocumenteerd. Bij grondonderzoek ontstaat op deze manier een database met basisgegevens (boringen, sonderingen, geofysische onderzoek, laboratoriumanalyses, enz.) en een database met interpretaties, zoals bijvoorbeeld een verzameling van gebiedsdekkende kaarten of grids waarin het ruimtelijk verloop van een bepaalde laag scheiding is weergegeven.

Tijdens de uitvoering van een grootschalig project zullen alle functionarissen verschillende keren met de verschillende stadia van databeheer worden geconfronteerd. Hun onderlinge samenwerking en de beslismomenten binnen deze samenwerking moeten worden geformaliseerd. Inzet 18 geeft een voorbeeld van een databeheerprotocol voor de database met korrelgroottegegevens van De Maaswerken, waarin concreet wordt ingegaan op het formaat van de data, de kwaliteitsborging, de locatie van databestanden en de taken van de verschillende functionarissen.



#### Inzet 18: Database voor korrelgrootte gegevens bij De Maaswerken

Bij De Maaswerken ligt de verantwoordelijkheid voor de kwaliteit van de korrelgrootte-analyses in de delfstoffendatabank bij twee personen: de dataleverancier en de databankbeheerder van de werkgroep Delfstoffen. De dataleverancier was verantwoordelijk voor de inhoudelijke kwaliteit van de gegevens (o.a. boorpuntcodes, plaatsbepaling van de monsterpunten, analysepercentages, zeefmethode, juiste gegevensformaat, etc.) Na levering voerde de databankbeheerder een globale controle uit op de inhoudelijke kwaliteit van de gegevens en het gegevensformaat. Daarna werden de gegevens gearchiveerd in de delfstoffendatabank en werden de potentiële gebruikers op de hoogte gesteld van de update. Binnen De Maaswerken was een speciale GIS toepassing in ArcView ontwikkeld om korrelgroottegegevens te koppelen aan kaartbeelden.

Afgesproken gegevens formaat voor korrelgrootte gegevens bij De Maaswerken:

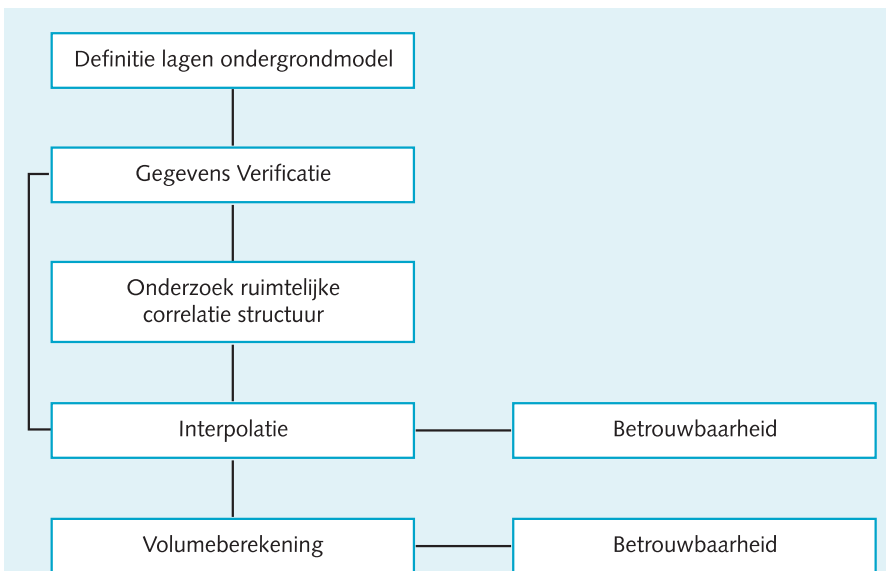
NITG	Nitg boring nummer (standaard)
Nat_droog	boring in natte of droge waterbodem (standaard)
Uitvoering	naam van uitvoerend bureau (standaard)
Project	codering van project waarbinnen monsters zijn genomen (standaard)
X	x-coördinaat (getal)
Y	y-coördinaat (getal)
Nap_van	NAP hoogte bovenkant monsternametraject (getal)
Nap_tot	NAP hoogte onderkant monsternametraject (getal)
C180	% met korrelgrootte groter dan 180 mm (getal)
C100	% met korrelgrootte groter dan 100 mm (getal)
C63	% met korrelgrootte groter dan 63 mm (getal)
C45	% met korrelgrootte groter dan 45 mm (getal)
C31_5	% met korrelgrootte groter dan 31.5 mm (getal)
C22_4	% met korrelgrootte groter dan 22.4 mm (getal)
C16	% met korrelgrootte groter dan 16 mm (getal)
C11_2	% met korrelgrootte groter dan 11.2 mm (getal)
C8	% met korrelgrootte groter dan 8 mm (getal)
C5_6	% met korrelgrootte groter dan 5.6 mm (getal)
C4	% met korrelgrootte groter dan 4 mm (getal)
C2	% met korrelgrootte groter dan 2 mm (getal)
C1	% met korrelgrootte groter dan 1 mm (getal)
C_500	% met korrelgrootte groter dan 0.500 mm (getal)
C_250	% met korrelgrootte groter dan 0.250 mm (getal)
C_180	% met korrelgrootte groter dan 0.180 mm (getal)
C_125	% met korrelgrootte groter dan 0.125 mm (getal)
C_090	% met korrelgrootte groter dan 0.090 mm (getal)
C_063	% met korrelgrootte groter dan 0.063 mm (getal)
C_012	% met korrelgrootte groter dan 0.012 mm (getal)



## 6 Interpretatie van veldgegevens

### 6.1 Inleiding

Dit hoofdstuk behandelt de interpretatie van veldgegevens om zo een betrouwbare schatting te krijgen van de grondstromen die vrijkomen bij de uitvoering van het project. De drie belangrijkste gegevens om de grondstromen te kwantificeren zijn: (1) de ligging van het maaiveld, (2) de relevante laagscheidingen en (3) het ontwerp van de voorgenomen ingrepen. Bij de interpretatie is het van belang dat er bij aanvang van het project eenduidige definities afgesproken zijn (zie Inzet 2). In dit hoofdstuk worden de gekozen definities in de context van een interpretatie geplaatst. De eerste stap naar een interpretatie van de veldgegevens is een kwaliteitscontrole, een verificatie van de metingen (zie figuur 6.1). Die stap moet vooraf gaan aan de interpretatie die gebruik maakt van klassieke statistische methoden om de mate van spreiding in de gegevens te analyseren. De interpretatie van de (ruimtelijk verspreide) veldgegevens vereist geostatistische technieken [e.g. Davis, 1986; Swan & Sandilands, 1995] dat wil zeggen ruimtelijke interpolatiemethoden die het mogelijk maken om gebiedsdekkend de ligging van laagovergangen te interpoleren op basis van punt- en lijnwaarnemingen. In dit handboek worden de belangrijkste geostatistische methoden toegelicht met voorbeelden uit het Grensmaasproject. Tot slot wordt ingegaan op de betrouwbaarheid van verschillende methoden en de vraag hoe om te gaan met de verschillende mate van betrouwbaarheid bij het maken van uiteindelijke volume en massa schattingen van de verwachte grondstromen aan vermarktbare en onvermarktbare materialen.



Figuur 6.1 Stroomschema voor de verwerking, verificatie en interpretatie van de veldmetingen om te komen tot volumeberekeningen van de verwachte grondstromen aan vermarktbare en onvermarktbare materialen.

**Inzet 19: Methodiek van de opbrengstberekeningen en schatting van de onzekerheden voor De Maaswerken**  
Op verzoek van projectbureau De Maaswerken is door TNO-NITG een rapport opgesteld waarin de methodiek is beschreven om op basis van geologische veldmetingen, een schatting te maken van de opbrengst aan bouwgrondstoffen [Bremmer et al., 2000]. Het rapport gaat ook in detail in op de gebruikte rekenmethodiek en geostatistiek en de

wijze waarop de onzekerheid van de opbrengst geschat is. Wassing et al. [2002] geeft een toegankelijke samenvatting van genoemd rapport met de nadruk op de methodiek voor volume en opbrengstberekeningen die zijn toegepast binnen het Maaswerken project. Het programma Meetstrategie 2000+ van de Meetkundige Dienst besteedt aandacht aan toepassing van geostatistiek bij waterbodemonderzoek [Kruyt & Hazelhof 1998].

#### **Inzet 20: Software binnen De Maaswerken**

Voor het beheer en de interpretatie van grondonderzoeksgegevens met een klassieke statistische methode zoals de geostatistiek is geen omvattend standaard pakket op de markt. Binnen projectbureau de Maaswerken is de volgende software gebruikt:

1. Database boorgegevens: DINO (geologie) en NAZCA (milieuhygiënisch); beiden op Oracle gebaseerd
2. Korrelgroottedatabase, berekeningen: Excel

3. Ruimtelijke Informatie: GIS (Esri-software: ArcView met extensies – spatial analyst, 3D-analyst, en ook ArcInfo)
4. Conventionele statistiek: Excel en Statistica
5. Ruimtelijke statistiek: Isatis
6. Opbrengst berekeningen aan korrelgrootte verdelingen: programma OpbrenGST [Gruijters & Zwang, 2001].
7. Rapportage en presentatie: Word, CorelDraw, Surfer, Designcad en eigen software binnen Arcinfo (profielen, etc.)

#### **Inzet 21: De eigenschappen van de rivierbodem na een ingreep**

Grondonderzoek moet ook de informatie leveren die nodig is om uitspraken te kunnen doen over het gedrag van de rivier en de weerstand van de rivierbodem tegen erosie na een ingreep. Bij De Maaswerken is het rekenmodel SOBEK gebruikt voor het voorspellen van mogelijke morfologische ontwikkelingen. In SOBEK wordt per vak van 400 meter

lengte een gemiddelde bodemopbouw berekend in lagen van 25 cm, waaraan tevens een korrelverdeling is gekoppeld. Het is belangrijk dat bij een dergelijke generalisatie van de bodemopbouw alle beschikbare informatie wordt gebruikt (boringen, sonderingen, seismiek) en dat een heel traject bijvoorbeeld niet op basis van één boring in het model wordt opgenomen.

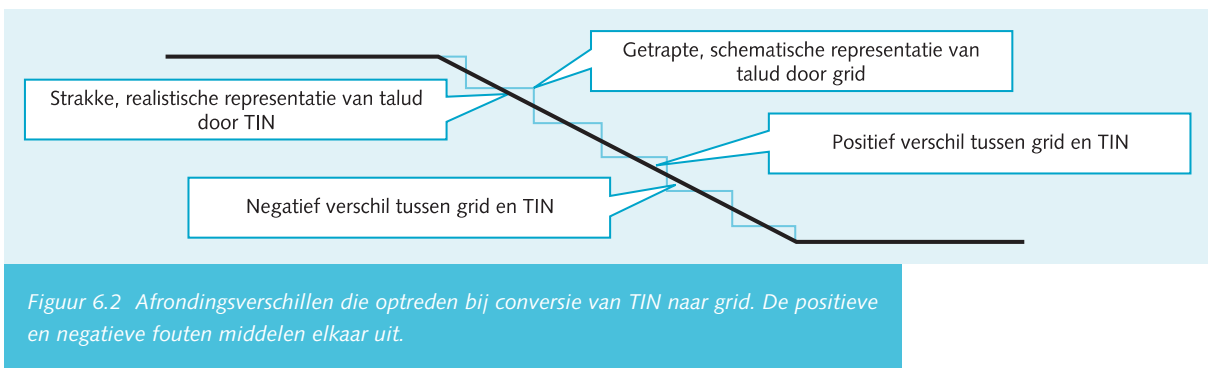
## **6.2 Definities van grensvlakken**

Definities dienen bij voorkeur zo opgesteld te worden dat de resultaten van een interpretatie van veld- en archiefgegevens ook bruikbaar zijn voor vragen uit andere interessegebieden. De te gebruiken definities moeten goed afgestemd zijn op het type veldgegevens. Als er bijvoorbeeld pulsboringen gebruikt zijn (een techniek die een oplossend vermogen van ongeveer 30 cm heeft), dan is het bijvoorbeeld niet zinvol om in de definitie van stoorlagen uit te gaan van een dikte dan 10 cm. Bij het berekenen van vrijkomende volumes grond bij de uitvoering van ingrepen worden veelal de volgende grensvlakken gebruikt (zie Figuur 1.3):

1. *Fysieke scheiding*: scheidingsvlakken die worden opgelegd door een bestaande situatie (bijvoorbeeld maaiveld) of door het ontwerp van de uit te voeren ingrepen.
2. *Geologisch scheidingsvlak*: het scheidingsvlak tussen de verschillende geologische eenheden die in het ondergrondmodel onderscheiden worden.
3. *Milieuhygiënische scheiding*: het scheidingsvlak tussen 'schoon' en 'verontreinigd' materiaal. Vanzelfsprekend moet hier wel duidelijk gedefinieerd worden wat onder 'schoon' en 'verontreinigd' wordt verstaan.

### 6.2.1 Fysieke scheidingen: maaiveld en ontwerp van de ingreep

Het is aan te bevelen om de hoogteligging van het maaiveld en de begrenzingen van de ingrepen (vaak in de vorm van een Voorlopig Ontwerp) digitaal beschikbaar te hebben. In de digitale bibliotheek van De Maaswerken waren deze scheidingsvlakken opgeslagen als Triangular Irregular Network (TIN). Een TIN is opgebouwd uit driehoeken, waarvan de hoogtes van de punten van de driehoek bekend zijn. Tussen de hoekpunten wordt lineair geïnterpoleerd. In de uiteindelijke volumeberekening worden alle relevante scheidingsvlakken met elkaar gecombineerd. Het is dan ook belangrijk dat alle vlakken een vergelijkbaar format hebben en een vergelijkbare datadichtheid bezitten. De berekeningen van de geologische scheidingsvlakken en de scheiding tussen schoon en verontreinigd materiaal komen tot stand door interpolatie van meetgegevens naar een gebiedsdekkend grid. Met de term grid worden gridcellen bedoeld met een bepaald oppervlak (bijv. 5 x 5 meter) waaraan een bepaalde waarde wordt toegekend. Bij het omzetten van TIN naar grid kunnen, met name bij steile terrein overgangen, afrondingsverschillen ontstaan. Voor de volumeberekeningen zijn deze verschillen echter niet van belang omdat positieve en negatieve verschillen elkaar uitmiddelen, zoals is geïllustreerd in Figuur 6.2.



### 6.2.2 Geologische scheidingsvlakken: deklaag, toutvenant en substraat

Bij het Maaswerkenproject zijn de definities voor de scheidingsvlakken om praktische redenen op basis van de lokale bodemsamenstelling opgesteld. Deze projectdefinities verschillen daarmee van de algemene definities voor deklaag en toutvenant (zie Inzet 2).

### 6.2.3 Definitie grensvlak schoon/verontreinigd

Bij het bepalen van het grensvlak schoon/verontreinigd is het uitgangspunt geweest dat de deklaag van bovenaf verontreinigd is. De grond wordt als schoon beschouwd als deze behoort tot vervuiliingsklasse 0 of 1. Valt de grond onder klasse 2, 3 of 4 dan wordt dit materiaal als verontreinigd beschouwd. De ligging van het grensvlak tussen schoon en verontreinigd wordt vastgesteld op basis van het in de deklaag diepst aangetroffen monster dat na analyse tot vervuiliingsklasse 2 of hoger blijkt te behoren [Scheffer, 2000]. Indien in een boring een monster wordt aangetroffen dat behoort tot vervuiliingsklasse 2 en hoger, dan geldt de onderkant van dat 'verontreinigde' monster als grensvlak tussen het schone en verontreinigde deel van de deklaag.

### 6.3 Gegevensverificatie met EDA

Verificatie van de veldgegevens is een belangrijke eerste stap (voorafgaand aan de eigenlijke interpretatie) om de gegevens te controleren op consistentie en interne integriteit. De stap van gegevens verificatie wordt vaak aangeduid met de term: Exploratory Data Analysis (EDA). In de EDA-fase krijgt de gebruiker een beeld van de opbouw van de gegevens, worden trends en afwijkingen gesignaleerd, vreemde waarden ('uitbijters') geanalyseerd, aannames getoetst en ruimtelijke verbanden onderzocht. De EDA-fase helpt bij de keuze van statistische en geostatistische interpretatiemethoden. De EDA-fase loopt tot en met het resultaat van de interpolaties, omdat aan de hand van de resultaten soms alternatieve interpretaties noodzakelijk blijken.

Voor elke ingreeplocatie binnen het Grensmaasproject is onderstaande EDA-procedure doorlopen:

1. controle van de basisgegevens;
2. onderzoek naar de bruikbaarheid van de beschikbare gegevens;
3. onderzoek van de verdeling van de waarnemingen: histogram-analyse; en
4. onderzoek van de ruimtelijke verdeling van de waarden (clustering).

#### 6.3.1 Controleren van de basisgegevens

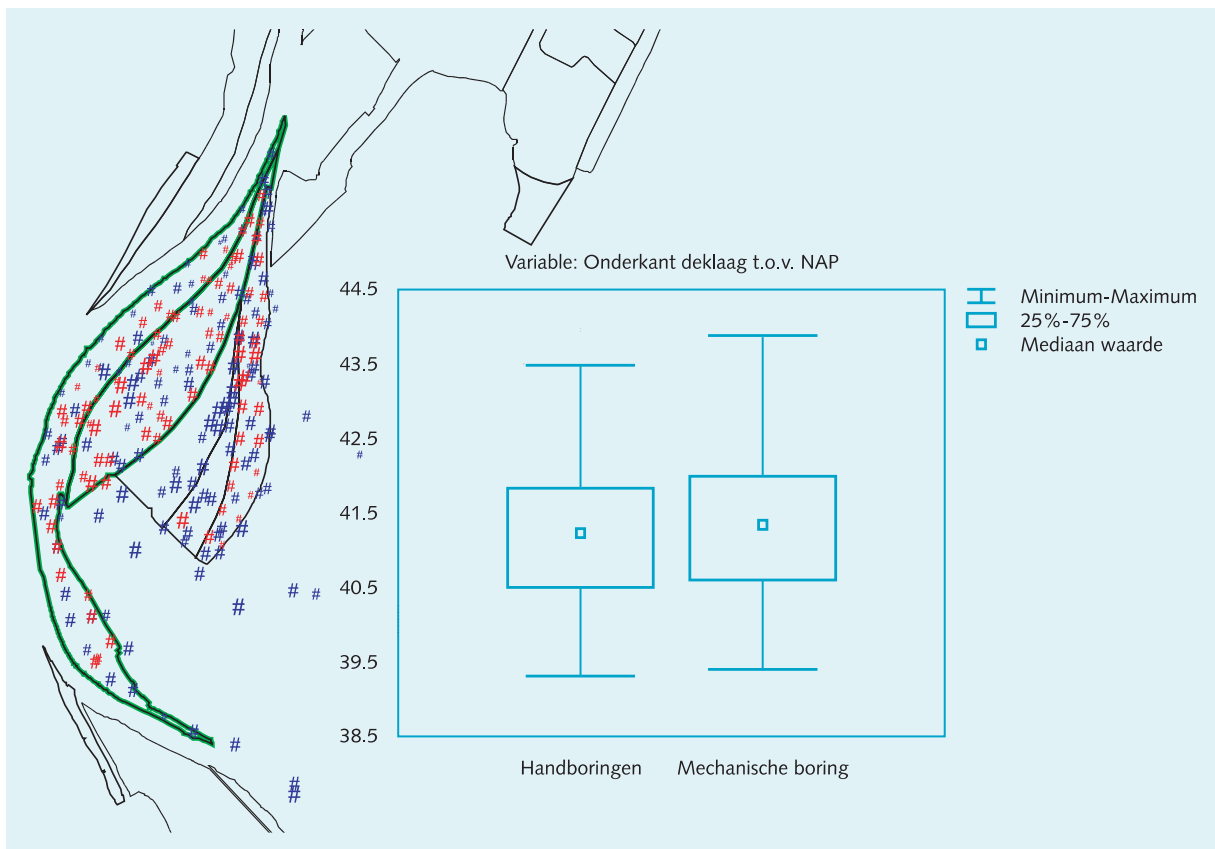
De eerste stap in de gegevensbewerking in deze procedure is dat voor alle beschikbare gegevens de ligging in het terrein wordt gecontroleerd. Dit gebeurt zowel met betrekking tot de RD-coördinaten als de hoogte ten opzichte van NAP. Daarnaast wordt de interpretatie van de ligging van de relevante laagscheidingen in de onderzoeksgegevens gecontroleerd: zijn de juiste definities gebruikt en zo nee, is er wellicht reden om de definitie bij te stellen? Gegevens waarvan onzeker is of basisgegevens juist zijn en correct geïnterpreteerd, worden buiten de verdere analyse gehouden.

#### 6.3.2 Bruikbaarheid van de veldgegevens

Gegevens zijn bruikbaar voor de interpretatie als de beoogde laagscheiding daadwerkelijk wordt aangetroffen. Daarbij staat de betrouwbaarheid van de metingen voorop: de uitkomsten van verschillende meettechnieken moeten onderling vergelijkbaar zijn indien deze gegevens bij de interpretatie worden gecombineerd. Ook metingen waarin een beoogd scheidingsvlak niet is aangetroffen zijn nog bruikbaar voor de interpretatie. Boringen waarvan niet vast is komen te staan of zij de onderkant van de deklaag dan wel het toutvenant hebben bereikt, geven aan dat de beoogde scheidingslaag dieper ligt dan de onderkant van de boring. Deze informatie hoort ook thuis in de uiteindelijke verzameling van gegevens die gebruikt wordt om een schatting te maken van de positie van de scheidingslaag.

Voor de bepaling van de ligging van de scheiding tussen deklaag en toutvenant zijn gegevens van machinale boringen en handboringen beschikbaar. De handboringen zijn voornamelijk gezet om milieu-analyses uit te voeren. Maar ook daar is geprobeerd om door te boren tot in het toutvenant (grind). Deze boringen wilden echter nog wel eens vastlopen in een lokale grindlaag ingeschakeld in de deklaag. Wordt deze stoorlaag geïnterpreteerd als toutvenant, dan wordt de werkelijke ligging van de scheiding deklaag-toutvenant te ondiep geschat. Ter controle of dit op grote schaal is voorgekomen, is per locatie een statistisch test uitgevoerd of de gegevenspopulaties van de handboringen en de mechanische boringen significant van elkaar verschillen (Zie Figuur 6.3). Daarbij wordt ook naar de ruimtelijke verspreiding van de hand- en de machinale boringen gekeken om te bezien of de twee typen boringen gelijkmatig over het onderzoeksgebied verdeeld zijn.

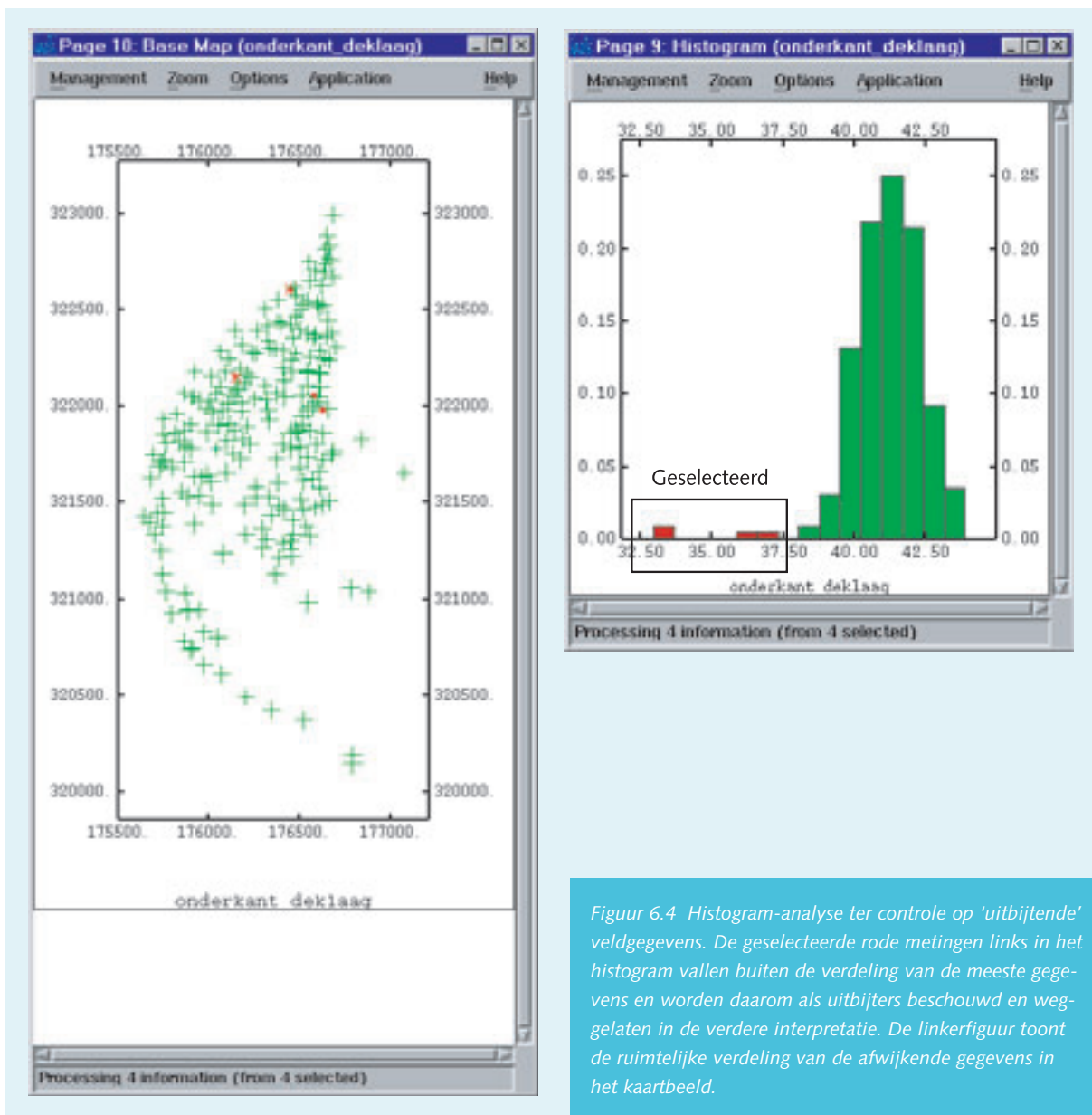




Figuur 6.3 Gegevensverificatie voor twee verschillende boormethoden voor een gebied in het Grensmaas project. De figuur vergelijkt de gegevens van handboringen en mechanische boringen voor de geïnterpreteerde NAP hoogte van de basis van de deklaag. Uit de inzet rechts blijkt dat, gemiddeld over alle locaties, het verschil tussen handboringen en machinale boringen voor de ligging van de basis van de deklaag niet statistisch significant is.

### 6.3.3. Histogram-analyse: controle op verdeling van waarnemingen

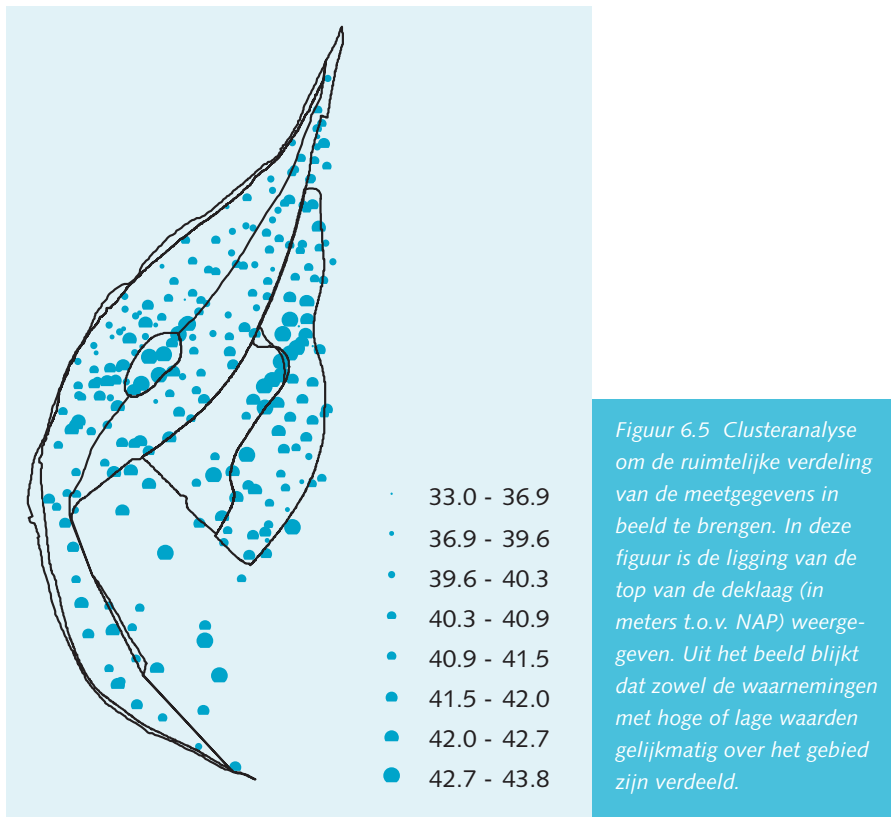
Om een set veldgegevens te controleren op uitbijters (afwijkende of foutieve metingen) is een histogram-analyse een goede methode om inzicht te krijgen in de spreiding en verdeling van de gegevens. De waarnemingen worden per klasse uitgezet tegen de frequentie van voorkomen (Figuur 6.4). Gerelateerd aan het kaartbeeld springen de uitbijters er duidelijk uit.



Figuur 6.4 Histogram-analyse ter controle op 'uitbijtende' veldgegevens. De geselecteerde rode metingen links in het histogram vallen buiten de verdeling van de meeste gegevens en worden daarom als uitbijters beschouwd en wegelaten in de verdere interpretatie. De linkerfiguur toont de ruimtelijke verdeling van de afwijkende gegevens in het kaartbeeld.

#### 6.3.4 Cluster analyse: controle op ruimtelijke samenhang van waarnemingen

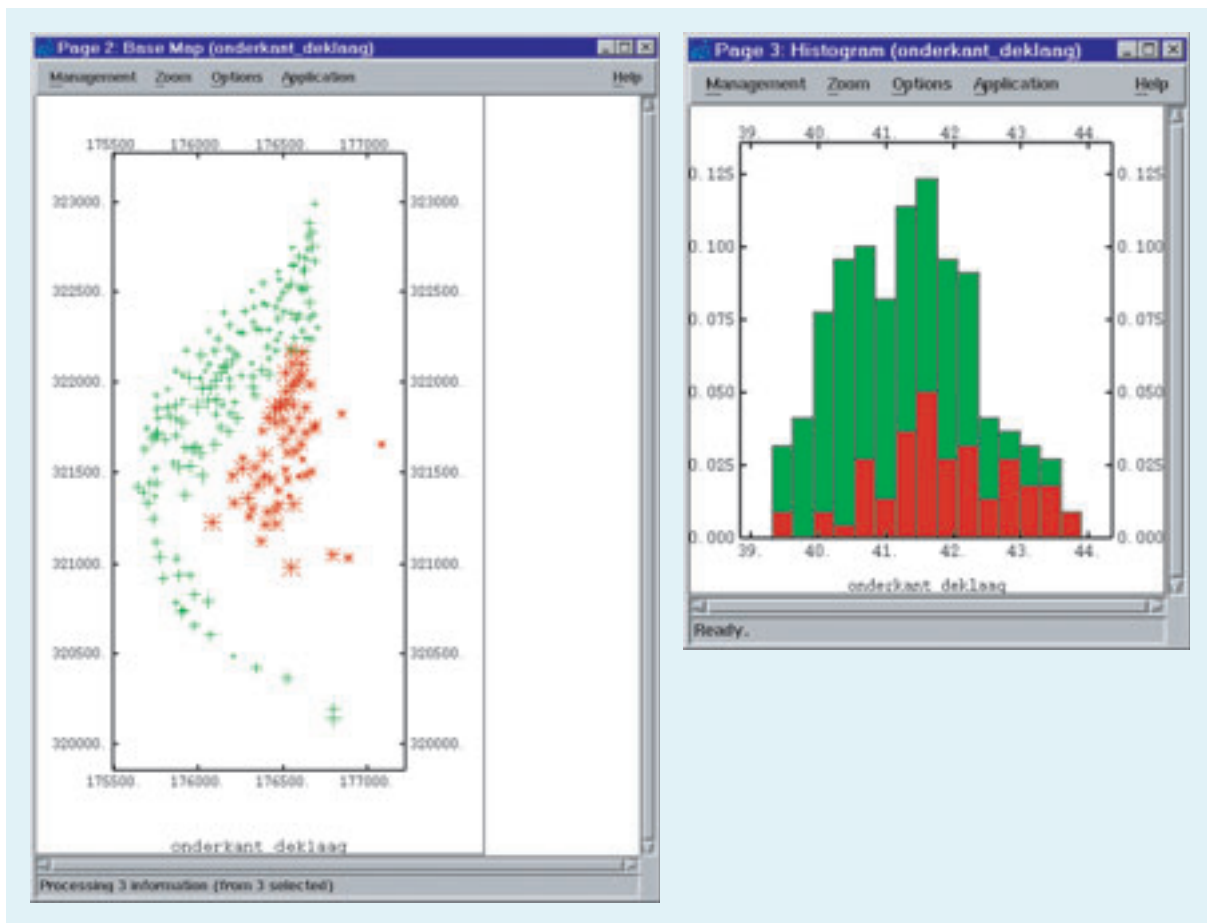
De volgende stap in de EDA is om de ruimtelijke verdeling van de waarnemingen na te lopen in relatie tot de meetwaarden. In eerste instantie wordt nagegaan of hoge waarnemingen gegroepeerd liggen in een bepaald deel van het gebied of verspreid over de locatie. Deze vorm van verificatie wordt clusteranalyse genoemd. Figuur 6.5 geeft een voorbeeld van een locatie waarbij hoge en lage waarden niet gegroepeerd, maar regelmatig over de locatie voorkomen. Zou uit de clusteranalyse daarentegen blijken dat hoge waarden beperkt zijn tot een bepaald gebied, dan kan besloten worden om de dataset voor verdere analyse te splitsen. Vervolgens kan worden nagegaan of het deelgebied met afwijkende meetwaarden samenhangt met een bepaald geologisch fenomeen, zoals een geulstructuur of een breuk.



*Figuur 6.5 Clusteranalyse om de ruimtelijke verdeling van de meetgegevens in beeld te brengen. In deze figuur is de ligging van de top van de deklaag (in meters t.o.v. NAP) weergegeven. Uit het beeld blijkt dat zowel de waarnemingen met hoge of lage waarden gelijkmatig over het gebied zijn verdeeld.*

Het is mogelijk dat de kennis van de plaatselijke geologie doet vermoeden dat een bepaald scheidingsvlak in een specifiek deel van de onderzoekslocatie duidelijk zal afwijken van de rest van de locatie. De dikte van de deklaag kan bijvoorbeeld sterk variëren afhankelijk van de afstand tot de rivier. Daarnaast kunnen er in de ondergrond breuken of terrassen voorkomen. In Figuur 6.6 is bijvoorbeeld de verdeling van de waarnemingen in het oostelijk deel van de onderzoekslocatie (in dit geval de kleiberging) vergeleken met het totaal aantal waarnemingen. Duidelijk blijkt dat er een homogene verdeling is over het totaal aantal waarnemingen en er dus geen reden is om de dataset te splitsen.

Zelfs al zou er op basis van de geologie een verschil moeten bestaan, dan nog kan het voorkomen dat de beschikbare data geen significant verschil laten zien. In dit geval moet een afweging gemaakt worden tussen statistische relevantie en geologie. Dit aspect onderstreept nog eens de noodzaak van nauwe samenwerking tussen beide disciplines.



Figuur 6.6 Histogram analyse van het onderzoek naar verschillen in waarnemingen die locatie afhankelijk zijn. De rechterfiguur toont het histogram van NAP hoogtes van de basis van de deklaag voor het oostelijk deel van de locatie die als kleiberging is gepland (in rood) en de rest van de locatie waar stroomgeulverbreding/weerdverlaging is gepland (in groen). Er is een homogene verdeling over het totaal aantal waarnemingen en dus geen reden om de dataset te splitsen.

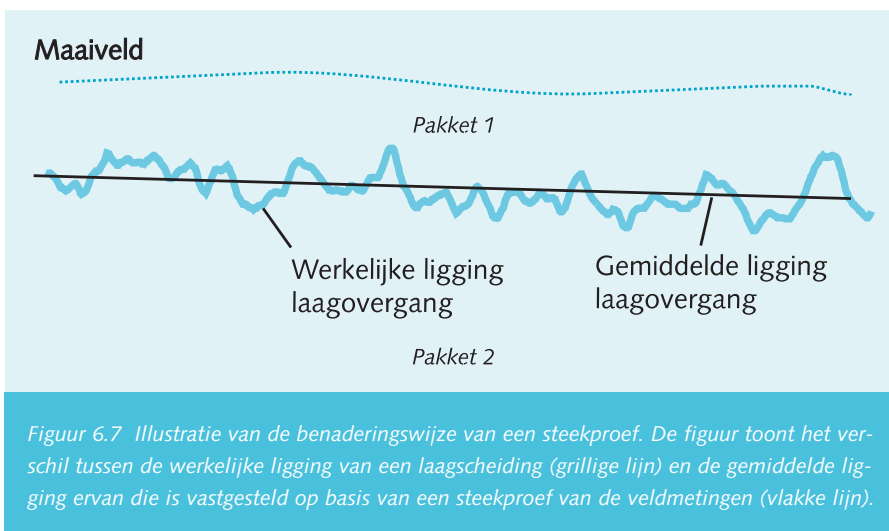
#### 6.4 Klassieke steekproef

Indien de interesse alleen uitgaat naar het gemiddelde volume, dan kan een klassieke steekproefbenadering volstaan. Deze steekproef bepaalt de gemiddelde ligging van de laagovergang in het gebied geschat aan de hand van het gemiddelde van de meetwaarden (zie Figuur 6.7). Het gemiddelde van een steekproef geeft altijd een zuivere schatting van het gemiddelde van de populatie. Door de variantie van de steekproefgemiddelden te bepalen ontstaat tevens inzicht in de spreiding in de dataset. Bij een gering aantal waarnemingen is de precisie van de schatting klein. Wanneer het steekproefgemiddelde gebruikt wordt om uitspraken te doen over betrouwbaarheidsintervallen, dan moet de spreiding van de populatie meegenomen worden omdat het gemiddelde gevoelig is voor extreme waarden. Met name bij scheve verdelingen zal het gemiddelde 'naar de extreme waarden toe trekken'. Wanneer bijvoorbeeld het gehalte aan stenen in het toutvenant gemiddeld 5% is, dan moet één waarneming met 17% stenen worden gecompenseerd door drie waarnemingen met een steengehalte van 1%.

Een steekproef geeft een evenwichtig beeld voor het hele onderzoeksgebied maar heeft de volgende beperkingen [Wassing et al., 2002]:

- De steekproef benadering geeft geen inzicht in de mate van nauwkeurigheid van individuele meetpunten.
- De steekproef kan geen lokale informatie leveren over de diepteligging en samenstelling van afzettingen op niet bemonsterde locaties.
- Bij een steekproef benadering kan moeilijk rekening worden gehouden met zogenaamde zachte informatie uit geofysische metingen als seismiek en geo-electriek die de ligging van laagseparaties met een zekere onzekerheidsmarge aangeven.

In de volgende paragrafen worden geostatistische interpolatiemethoden besproken die weliswaar gecompliceerder zijn dan de steekproef methode maar geen last hebben van bovenstaande beperkingen.



#### Inzet 22: De risico's van een te beperkte steekproef

Bij de Grensmaas is in het kader van de Milieu Effect Rapportage (MER) een inschatting gemaakt van de te verwachten opbrengst aan delfstoffen. De ingreeplocatie met de meeste boordata was Borgharen. Op basis van de toen beschikbare negen boringen binnen het kleischerm is een gemiddelde dikte van het toutvenantpakket van 5,5 meter bepaald. Voor de deklaag was (op basis van 14 boringen) een gemiddelde dikte van 2-2,5 m berekend. Aan het einde van de meetcampagne zijn voor het dimensioneren van het ontwerp op de plaats van het kleischerm

in totaal 53 boringen uitgevoerd tot aan de basis van het toutvenantpakket. Volgens deze nieuwe steekproef bedroeg de gemiddelde dikte van het toutvenant ca. 4,7 meter. Voor de deklaag zijn in deze fase 25 extra handboringen gezet, die resulteerden in een gemiddelde dikte van 1,35 m!

Door een groter aantal waarnemingen is er een aanzienlijke verschuiving ontstaan in de verwachte diktes van de deklaag en het toutvenant pakket. Hieruit blijkt nog eens het risico van uitspraken op basis van een te beperkte steekproef.

## 6.5 Analyse van de ruimtelijke correlatiestructuur

Om van een set van puntwaarnemingen naar een gebiedsdekkende schatting te komen, zijn geostatistische interpolatie methoden noodzakelijk. De twee voornaamste geostatistische methoden voor het schatten van waarden tussen ruimtelijk verdeelde meetpunten in zijn kriging (zie paragraaf 6.6) en stochastische simulatie (zie paragraaf 6.7).

Methoden voor interpolatie gaan uit van de ruimtelijke correlatiestructuur tussen de waarnemingen, wat betekent dat waarnemingen die dichtbij elkaar liggen meer op elkaar lijken dan waarnemingen die verder van elkaar weg liggen. Met een variogram-analyse kan deze ruimtelijke afhankelijkheid van de gegevens worden onderzocht. Een variogram is een wiskundige functie die de ruimtelijke structuur van een dataset beschrijft. Op basis van de gegevens worden eerst individuele punten van het variogram berekend, zo ontstaat een experimenteel variogram. Hiermee kan de wiskundige functie, de lijn die door alle punten van het experimenteel variogram loopt, worden afgeleid. Die functie is het variogrammodel dat als basis dient voor de ruimtelijke interpolatie van de veldmetingen.

### 6.5.1 Experimenteel variogram

Uit een set veldgegevens is een experimenteel variogram te berekenen door alle waarnemingen met elkaar te vergelijken. Een experimenteel variogram levert per puntenpaar twee variabelen op: de afstand tussen twee meetpunten en de mate van verschil tussen de twee meetwaarden die wordt omgerekend tot de semivariantie: het gekwadrateerde verschil tussen de meetwaarden. Vervolgens worden deze gegevens geordend, door de afstanden tussen de puntenparen in klassen in te delen, en alle verschillen die in de afstandsklasse vallen te middelen, zodat per afstandsklasse een gemiddeld verschil overblijft. Door nu de afstandsklasse uit te zetten op de x-as tegen de bijbehorende gemiddelde semivariantie op de y-as wordt een experimenteel variogram verkregen (zie Figuur 6.8).

Uit de berekeningswijze van het experimenteel variogram blijkt één belangrijke aanname, namelijk dat de verschillen tussen de waarnemingen in een bepaald gebied alleen afhankelijk zijn van de afstand tussen de waarnemingen, en niet van de locatie van de waarnemingen zelf. Immers, de waarde in het experimenteel variogram voor een bepaalde afstandsklasse is het gemiddelde van alle semivarianties van puntenparen in die afstandsklasse, ongeacht waar de waarnemingen zich in het gebied bevinden. Deze aanname wordt wel de stationariteitsaanname genoemd. Voordat een op variogrammen gebaseerde interpolatiemethode gebruikt wordt, is het dan ook belangrijk om te controleren of dit uitgangspunt aannemelijk is. Dit kan door te kijken of de puntenparen, waarop de waarde van het experimenteel variogram is gebaseerd, gelijk over het gebied verdeeld zijn (zie clusteranalyse in Figuur 6.5). Is er in het terrein een discontinuïteit (bijvoorbeeld een breuk) dan geldt de stationariteitsaanname niet en moet het gebied in deelgebieden worden gesplitst.

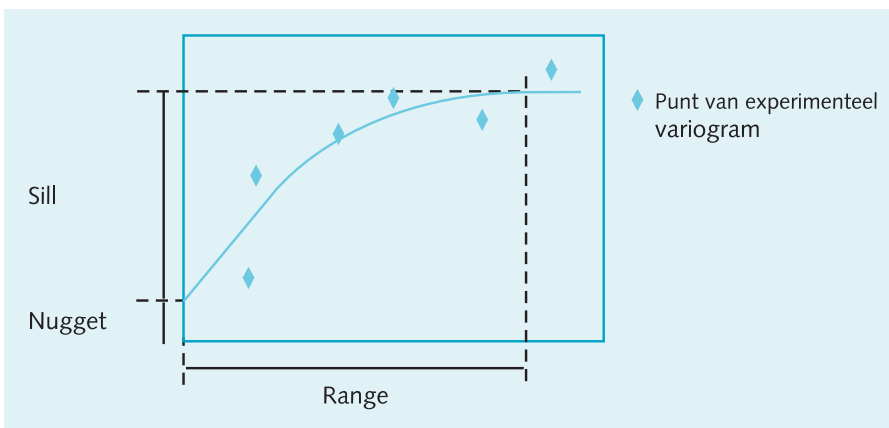
### 6.5.2 Van het experimenteel variogram naar het variogrammodel

Een experimenteel variogram geeft alleen inzicht in de mate van correlatie voor de afstand tussen de puntenparen voor de set meetgegevens. Voor latere berekeningen is ook noodzakelijk dat de mate van correlatie berekend wordt voor punten op een bepaalde afstand van elkaar, die niet door het experimenteel variogram worden gegeven. Deze tussenliggende gegevens kunnen worden verkregen door het experimenteel variogram om te zetten in een variogrammodel. Het variogrammodel is de wiskundige beschrijving van dit experimentele variogram ofwel de functie die de lijn tussen alle punten uit het experimenteel variogram beschrijft (de lijn in Figuur 6.8).



Met het variogrammodel is in tegenstelling tot het experimenteel variogram nu wel voor elke afstand de mate van correlatie bekend. Het variogram model kent de volgende parameters:

- nugget; de hoogte van de semivariantie die niet verklaard wordt door ruimtelijke afhankelijkheid in de data,
- sill; de hoogte van de semivariantie die wel verklaard wordt door ruimtelijke afhankelijkheid in de data,
- range; de maximale afstand waarover sprake is van ruimtelijke afhankelijkheid tussen datapunten.



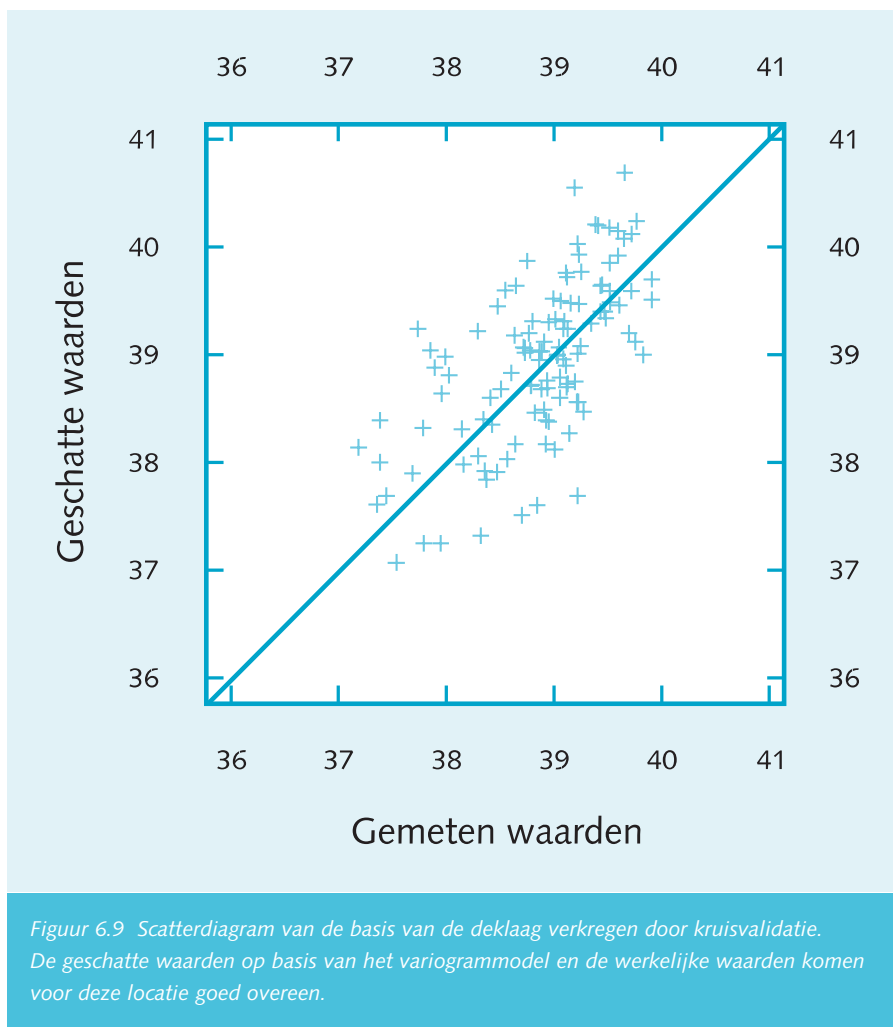
*Figuur 6.8 Voorbeeld van een experimenteel variogram voor een scheidingsvlak. De grafiek toont de afstand tussen puntenparen op de x-as. De semivariantie, de mate waarin de meetwaarde van het puntenpaar verschilt is aangegeven op de y-as.*

### 6.5.3 Gebruik van 'dieper dan' informatie in het variogrammodel

Voor waarnemingen die de onderkant van de deklaag of het toutvenant niet gehaald hebben, wordt een schatting gemaakt van de meest waarschijnlijke ligging van de onderkant, gegeven het feit dat deze dieper moet liggen dan het diepste punt van de waarneming. Van alle waarnemingen die de onderkant wel gehaald hebben wordt nu een variogram geconstrueerd. Vervolgens wordt voor alle waarnemingen die het beoogde grensvlak niet gehaald hebben het gegeven dat het grensvlak dus dieper moet liggen dan het diepste punt van deze waarneming gebruikt om een eerste schatting te maken van de eventuele ligging van het grensvlak. Het variogram voor alle waarnemingen, inclusief de geschatte onderkant voor de 'niet gehaalde' waarnemingen, wordt berekend en mag slechts in zeer geringe mate afwijken van het opgegeven variogram. Door deze berekening een aantal keren uit te voeren en het gemiddelde te berekenen, wordt een schatting gemaakt van de onderkant van de deklaag of het toutvenant die voldoet aan het variogram zoals dat is berekend met behulp van de waarnemingen die de onderkant wel gehaald hebben. Op deze manier wordt er voor aan alle waarnemingen een waarde toegekend voor de onderkant van de deklaag en/of het toutvenant.

#### 6.5.4 Kruisvalidatie

Voor een inschatting van de juistheid van het variogrammodel wordt een kruisvalidatie uitgevoerd. Bij een kruisvalidatie wordt telkens één waarneming uit de verzameling gewist en wordt er vervolgens op dezelfde plaats een schatting gemaakt van de weggelaten waarneming, op basis van de overgebleven waarnemingen. Een scatterdiagram van de geschatte waarden uitgezet tegen de werkelijke waarden geeft een indruk van de betrouwbaarheid van het variogrammodel. In het ideale geval is het verschil tussen de geschatte waarde en de gemeten waarde nihil: de 1:1 lijn. Hoe smaller de puntenwolk om deze 1:1 lijn, hoe beter de schatting is. Figuur 6.9 toont een voorbeeld van een scatterdiagram van de basis van de deklaag.



## 6.6 Interpolatie door middel van Kriging

De ligging van een laagvlak blijkt in de praktijk een sterkere correlatie met geologische processen te vertonen dan de dikte. Er mag dan ook een grotere ruimtelijke samenhang verwacht worden tussen de directe waarnemingen zelf, dan tussen een afgeleide parameter zoals dikte. Daarnaast geldt het probleem dat bij het gebruik van diktes de relatie tot het maaiveld een grote rol speelt. Het maaiveld vertoont vaak ingrepen door de mens, zodat diktes, vooral boven in het profiel, niet een afspiegeling hoeven te vormen van de oorspronkelijke, sedimentologische dikte maar van latere verstoring. In de klassieke statistische benadering wordt deze ruimtelijke afhankelijkheid niet expliciet in de berekeningen meegenomen; met geostatistische interpolatie is dat wel mogelijk. Het tweede deel van deze paragraaf behandelt de kriging standaard deviatie (KSD) waarmee een maat voor de betrouwbaarheid van het met kriging geïnterpoleerde oppervlak kan worden gegeven.

### 6.6.1 Werkwijze kriging

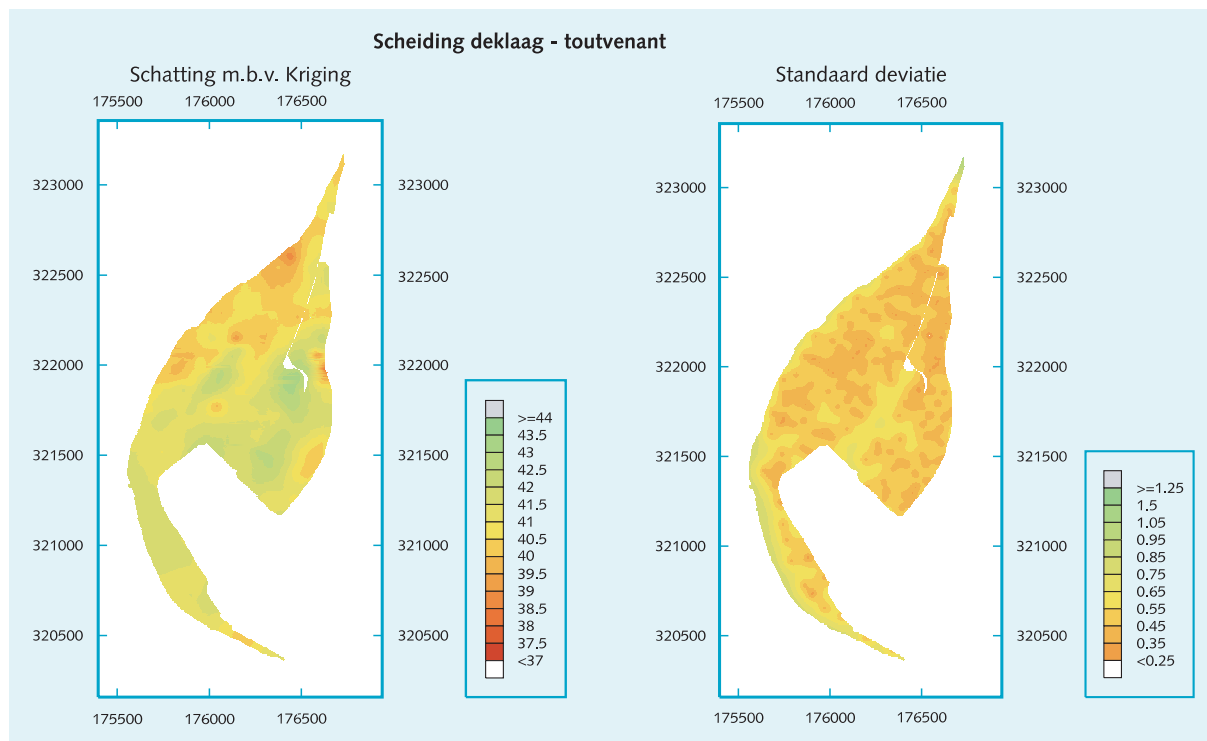
Kriging gebruikt de ruimtelijke correlatiestructuur (zoals gedefinieerd in het variogrammodel, zie paragraaf 6.5) om weegfactoren te bepalen voor de waarnemingen die worden gebruikt om een waarde te schatten op een niet gemeten punt. De Kriging procedure schat de waarde van de betreffende parameter op een onbemeten punt met een lineaire combinatie van beschikbare waarnemingen in de directe omgeving. Iedere waarneming krijgt een bepaald gewicht dat afhankelijk is van twee factoren: (1) de correlatie uit het variogram, die gebaseerd is op de afstand tussen het te schatten punt en de omliggende waarnemingen; en (2) de mate van 'clustering' van waarnemingen.

Het resultaat van Kriging is een optimale, 'unbiased', schatting van de ligging van de scheidingslaag. Met optimaal wordt bedoeld dat het verschil tussen de werkelijke en de geschatte waarde, gegeven het variogrammodel, minimaal is. 'Unbiased' betekend dat de gemiddelde schattingsfout nul is als alle schattingen bij elkaar worden genomen. Er is geen tendens om, alle schattingen meegenomen, de waarden te over- of onderschatten.

Kriging werkt met een gewogen gemiddelde. Een van de nadelen is dan ook dat het berekende vlak te weinig variatie vertoont: het is een 'smooth' vlak waar de extremen zijn uitgewist. Voor het berekenen van een gemiddelde parameter hoeft dit niet nadelig te zijn, maar voor een realistisch beeld van de ligging van het vlak is het door Kriging verkregen vlak niet geschikt.

### 6.6.2 Betrouwbaarheid van een laagscheiding met Kriging Standaard Deviatie

De Kriging interpolatietechniek levert ook een maat voor de betrouwbaarheid van de schatting: de Kriging Standaard Deviatie (KSD). KSD wordt berekend uit het variogram en de afstand van het te schatten punt t.o.v. de omliggende waarnemingen. Hoe dichter een te schatten punt bij een waarneming ligt, hoe lager de semivariantie (zoals af te lezen uit het variogram) en hoe beter de schatting. De configuratie van waarnemingen rondom het te schatten punt is daarom bepalend voor de Kriging Standaard Deviatie. De KSD is onafhankelijk van de waarde van de waarnemingen zelf. In Figuur 6.10 worden de resultaten van een Kriging interpolatie en de bijbehorende KSD-waarden weergegeven.



Figuur 6.10 Het resultaat van de kriging interpolatiemethode. De linkerfiguur toont de diepte (t.o.v. NAP) van de basis van de deklaag voor een van de gebieden uit het Grensmaasproject op basis van kriging interpolatie door de veldmetingen. De rechterfiguur toont de bijbehorende Kriging Standaard Deviatie (KSD): een maat voor de betrouwbaarheid van de diepteligging van het geïnterpoleerde laagvlak verkregen met kriging.

De KSD biedt om de volgende twee redenen in de praktijk geen goede maat voor de betrouwbaarheid van de interpolatie:

- De variantie is niet altijd stationair. Indien de waarnemingen in een deel van het onderzochte gebied een groter verschil vertonen dan in een ander deel van dat gebied, dan is de standaard deviatie geen goede maat voor het kwantificeren van de onzekerheid in een schatting.
- De hoogte van de Kriging Standaard Deviatie is alleen afhankelijk van de afstand tot de omliggende waarnemingen en niet van de (verschillen in) de waarden van deze waarnemingen. Dit is niet in overeenstemming met wat verwacht mag worden van de ruimtelijke verspreiding van de onzekerheid in de schatting.

Voor elke individuele schatting van de ligging van het laagvlak per gridcel geldt dat deze de meest optimale schatting is. Dat wil zeggen dat de schattingsfout voor die gridcel geminimaliseerd is. Het totale laagvlak dat geschat wordt met behulp van Kriging hoeft echter niet de beste, meest optimale, schatting te zijn. Hiervoor zijn verschillende redenen aan te voeren:

- De geïnterpoleerde vlakken vertonen een gelijkmatig uiterlijk, waarbij lokale variaties zijn weggemiddeld. Lage waarden worden overschat en hoge waarden worden onderschat. Deze 'conditional bias' is niet uniform over het gebied, maar is afhankelijk van de configuratie van de waarnemingen ten opzichte van de te schatten punten. Dichtbij waarnemingen is deze 'bias' minder groot dan verder weg, waardoor een geïnterpoleerd laagvlak meer variatie vertoont in gebieden met meer waarnemingen dan in gebieden met weinig waarnemingen.
- De uitkomst van de interpolatie vertegenwoordigt een verwachtingswaarde van de

ligging van het laagvlak per gridcel over het gehele gebied. Voor elke individuele locatie (cel) geldt dat, indien het mogelijk is om vele malen de geschatte waarde te bepalen, het gemiddelde gelijk zal zijn aan de verwachtingswaarde. De verwachtingswaarde is dus niet een waarde die ook in werkelijkheid hoeft voor te komen.

De KSD kan niet worden gebruikt om een idee te krijgen van de spreiding in de mogelijke ligging van het laagvlak rond de verwachtingswaarde. Dit komt omdat de KSD op elk punt alleen afhankelijk is van de afstand tot de waarnemingen die gebruikt zijn voor de schatting op die plek, en niet van de lokale variatie in deze waarnemingen zelf. Verder is de verwachtingswaarde en de Kriging Standaard Deviatie lokaal (op het geschatte punt) geldig en vertoont deze een zwakke relatie met de omliggende schattingen. Elke individuele schatting is optimaal maar het geheel van alle schattingen over een gebied hoeft dat niet te zijn. Het is daardoor niet mogelijk om vanuit de verwachtingswaarde en de Kriging Standaard Deviatie een betrouwbaarheid voor de ligging van het gehele vlak te bepalen. Met conditionele simulaties kan aan deze tekortkoming van Kriging tegemoet worden gekomen.

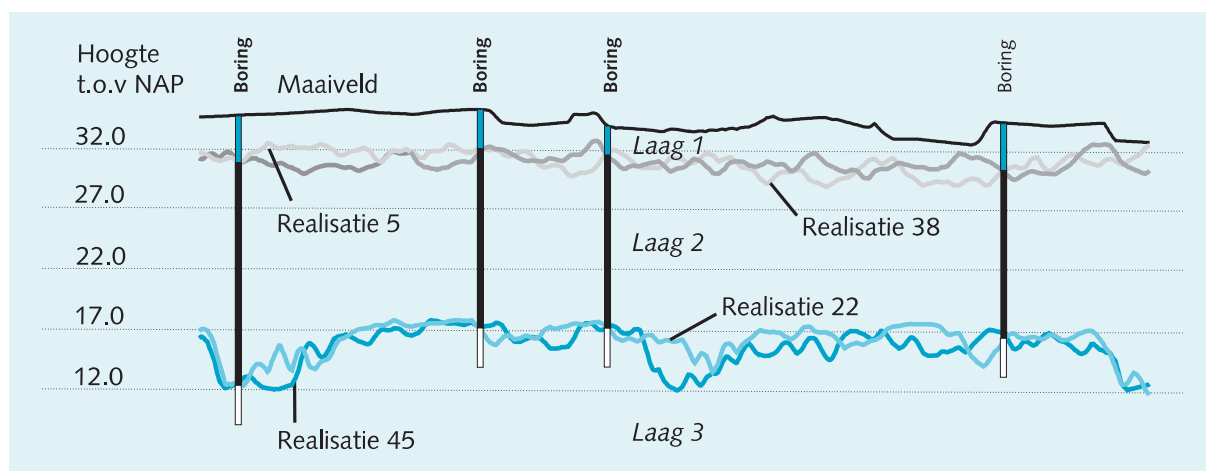
## 6.7 Conditionele simulaties

Het besef dat het laagvlak, door Kriging interpolatie berekend, de verwachtingswaarde geeft en niet de werkelijke ligging van het vlak, heeft geleid tot de ontwikkeling van conditionele simulatietechnieken. Met die technieken is het mogelijk om verschillende, maar even waarschijnlijke, realisaties van de werkelijke ligging van het laagvlak te genereren. Aan de simulatietechniek worden drie voorwaarden gesteld:

- Het gesimuleerd laagvlak moet 'door' de waarnemingen gaan. 'De werkelijkheid' is immers bekend: de ligging van het laagvlak is hier gemeten.
- De statistische verdeling (het histogram) van het gesimuleerde grensvlak moet gelijk zijn aan die van de verdeling van de waarnemingen.
- De ruimtelijke correlatiestructuur moet voldoen aan het variogram.

Er zijn zeer veel laagvlakken te berekenen die aan deze drie condities tegemoet komen. Het is niet te zeggen welke van deze gesimuleerde laagvlakken met de werkelijkheid overeenkomt. Ze voldoen alle aan de opgelegde criteria, maar ze kunnen van elkaar verschillen.

Het voordeel van dergelijke simulaties is dat ze, naast een correcte manier van het berekenen van globale onzekerheden, tevens een uitspraak doen over de onnauwkeurigheid van de lokale ligging van een laagvlak. Nadeel is echter dat de berekeningen meer rekentijd kosten. Voor een stochastische simulatie kan worden uitgegaan van de analyse van de gegevens zoals die in de eerste fase is uitgevoerd. De simulatietechniek levert de verschillende mogelijke liggingen van een laagvlak. In principe worden bij simulaties verschillende mogelijke vlakken berekend tussen de datapunten; vlakken die alle even waarschijnlijk zijn, want ze voldoen aan alle randvoorwaarden die gesteld zijn aan de simulatie (zie Figuur 6.11). Door voor elke combinatie van twee laagvlakken (d.w.z. de onder- en bovengrens) het volume te berekenen, ontstaat een verzameling van mogelijke volumes, waaruit een gemiddeld volume en een spreidingsmaat kan worden berekend. Tevens kan voor ieder laagvlak de gemiddelde ligging en de spreiding hieromheen worden berekend.



*Figuur 6.11 Het resultaat van stochastische simulatie: een aantal gesimuleerde laagseparaties met de bijbehorende set boringen, de opgelegde harde waarnemingen, waar de simulaties doorheen moeten lopen.*

De geostatistiek biedt verschillende methoden om gesimuleerde laagvlakken te berekenen. In het Grensmaasproject is gekozen voor de 'Sequentiële Gaussische Simulatie' (SGS). De belangrijkste reden om voor deze techniek te kiezen, ligt in het feit dat SGS relatief snel is, terwijl geostatistische simulaties over het algemeen zeer rekenintensief zijn.

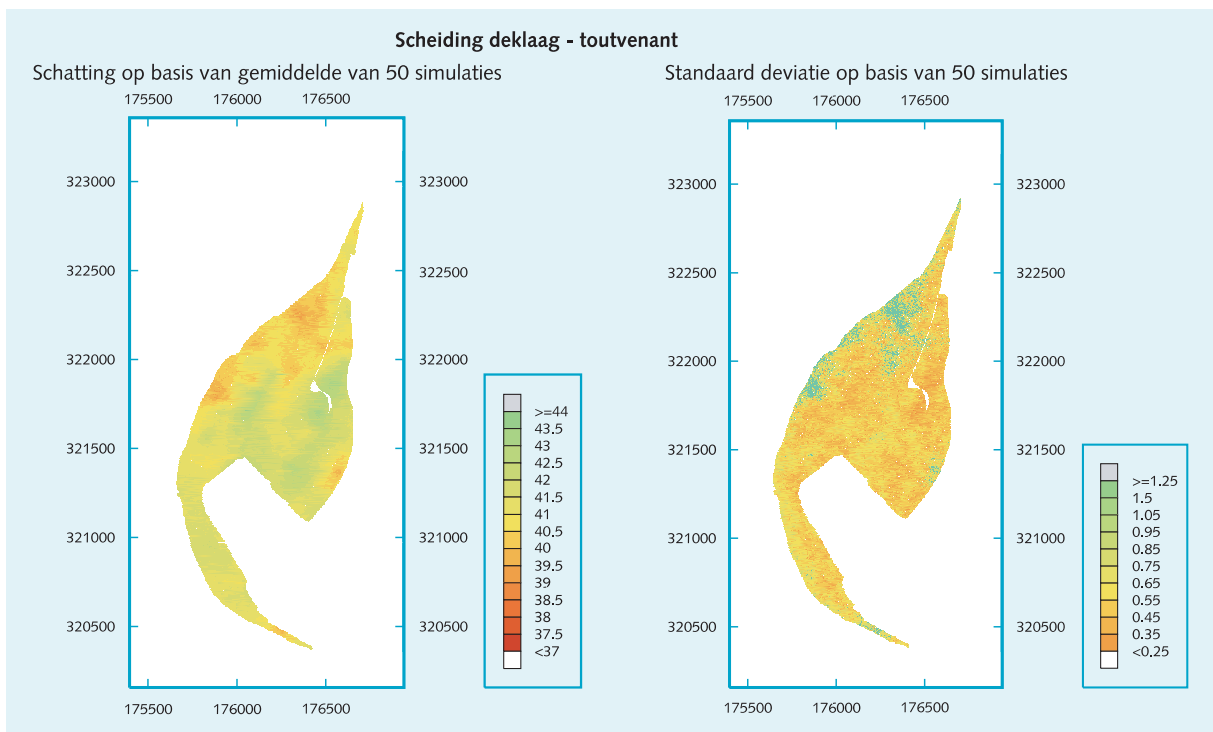
Bij een SGS worden de volgende stappen doorlopen:

1. De waarnemingen worden getransformeerd naar een standaard normale Gaussische verdeling (gemiddelde is 0 en standaard deviatie is 1). De simulatie-techniek vereist dat er een willekeurige waarde wordt getrokken uit een normaal verdeelde variabele. De transformatie naar een standaard normale verdeling moet gebeuren om de grote verschillen in de waarnemingen op de oorspronkelijke meet-schaal terug te brengen naar een normaal verdeelde schaal.
2. Er wordt een variogram bepaald van de getransformeerde waarnemingen.
3. Voor elke gridcel in het gebied worden m.b.v. Kriging een schatting en een standaard deviatie berekend, gebaseerd op de omliggende waarnemingen en de al eerder gesimuleerde schattingen.
4. Uit de normale verdeling van de schatting en de standaard deviatie wordt willekeurig een waarde getrokken: dit is de gesimuleerde waarde voor de gridcel.
5. De gesimuleerde waarde wordt terug getransformeerd naar de oorspronkelijke waarde.

Door deze procedure voor elke gridcel in het gebied uit te voeren, wordt een gesimuleerd laagvlak berekend, ook wel een *realisatie* genoemd. Door het hele grid van het gebied meerdere malen, in verschillende volgordes, af te werken, worden meerdere realisaties berekend. Uit deze realisaties kan voor elke gridcel het gemiddelde en de standaard deviatie van de ligging van het laagvlak worden berekend. Deze standaarddeviatie geeft een maat van de lokale betrouwbaarheid van de schatting van de ligging van het laagvlak. Op basis van het gemiddelde en de standaarddeviatie kan bijvoorbeeld een kaart worden gemaakt die per gridcel aangeeft hoe groot de kans is dat de betreffende laagseparatie boven of onder een bepaalde hoogte t.o.v. NAP ligt. Dergelijke kaarten kunnen zeer nuttig zijn bij risicobeschouwingen in de uitvoeringsfase.



Figuur 6.12 toont het kaartbeeld van het gemiddelde van 50 simulaties van het scheidingsvlak van deklaag en toutvenant met de bijbehorende standaard deviatie. Figuur 6.10 toont hetzelfde vlak maar dan alleen berekend met Kriging. Het resultaat van Kriging is goed vergelijkbaar met het vlak 'van het gemiddelde van de 50 simulaties'. De standaard deviatie wijkt echter duidelijk af van die van de Kriging (vergelijk de rechterhelft van de Figuren 6.10 en 6.12). Met Kriging zijn de waarnemingen duidelijk terug te zien in het kaartbeeld; daar is immers de standaard deviatie 0. Tussen de waarnemingen in neemt de standaard deviatie toe met een grotere afstand tot de waarneming. Bij de standaard deviatie, zoals berekend uit de 50 simulaties is dit veel minder het geval. De standaard deviatie is bij de simulaties beter verdeeld over het gebied. Het kaartbeeld van de verdeling van de standaard deviatie, zoals berekend uit de simulaties, levert een realistischer beeld op van de verwachte spreiding van de geschatte waarden dan bij Kriging.

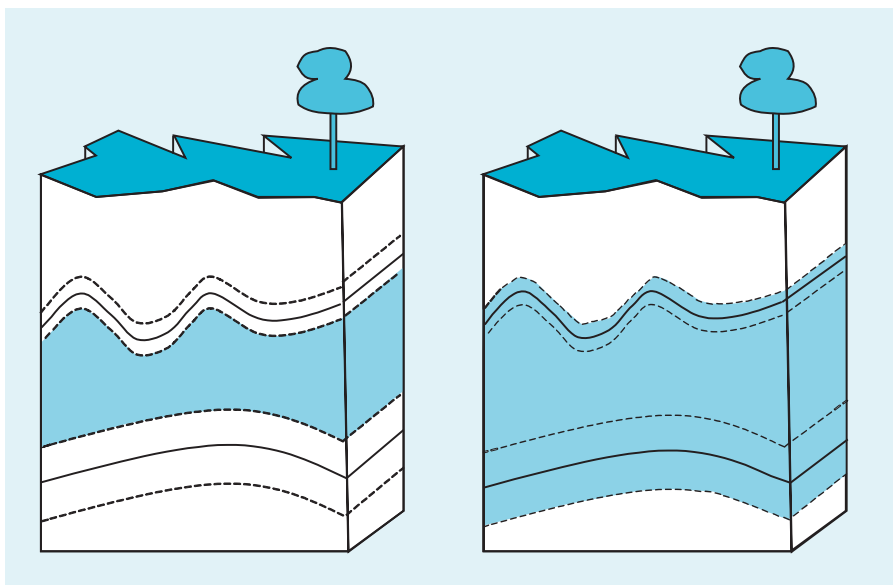


Figuur 6.12 De verwachtingswaarde van de diepteligging van de basis deklaag voor een gebied uit het Grensmaasproject op basis van 50 simulaties (links). Het rechterdeel van de figuur toont de bijbehorende standaard deviatie op basis van conditionele simulaties. (Het resultaat van de figuur kan worden vergeleken met Figuur 6.10 waarin de ligging van het zelfde laagvlak met de kriging interpolatie methode is afgeleid).

## 6.8 Volumeberekening

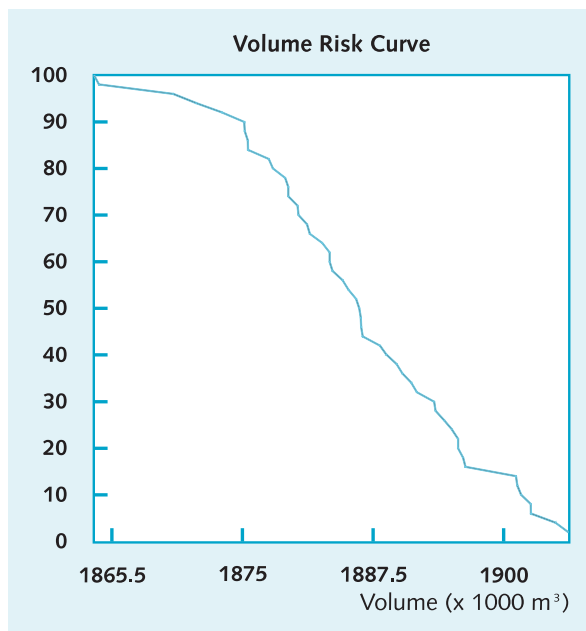
Bij een volumeberekening worden de gegevens van alle relevante laagscheidingen in een bepaald gebied gebruikt. Voor het Grensmaasproject is een grid cel van 5 x 5 meter, waarbinnen de dikte van deklaag, toutvenant en substraat (gelegen tussen het maaiveld en het ontwerp van de ingreep) berekend zijn. Vermenigvuldiging met het gridoppervlak en sommatie over het gehele gebied geeft het totale vrijkomende volume van deze verschillende grondstromen bij de uitvoering van de ingreep.

Wordt voor de volumeberekening de verwachtingswaarde van de laagscheidingen berekend met de met Kriging geïnterpoleerde vlakken, dan is dit volume het gemiddelde volume voor het hele gebied. De marges voor dit volume zijn echter niet met behulp van de Kriging Standaard Deviatie (KSD) te bepalen. Vaak wordt de KSD hier ten onrechte voor gebruikt, door per scheidingsvlak twee nieuwe laagvlakken te berekenen: één waarbij per gridcel van het gemiddelde vlak één keer de KSD is afgetrokken en een waarbij per gridcel één keer de KSD bij het gemiddelde is opgeteld (zie Figuur 6.13).



*Figuur 6.13 Voorbeeld van het foutief gebruik van de KSD bij de berekening van betrouwbaarheidsintervallen voor een gemiddeld volume. De doorgetrokken lijnen geven de werkelijke laagscheidingen weer. De gestippelde lijnen geven de gemiddelde ligging van de laagscheiding, vermeerderd of verminderd met één maal de KSD van het 68% betrouwbaarheidsinterval van het gemiddelde volume. De arcering in het linkerfiguur toont de kleinste mogelijke waarde van het volume tussen beide laagscheidingen. De arcering in de rechterfiguur toont de grootste mogelijke waarde. Beide uitersten zijn echter niet te beschouwen als de 68% betrouwbaarheidswaarden voor het gemiddelde volume: de kans dat alle cellen tegelijk een waarde aannemen die één keer de KSD verwijderd is van het gemiddelde, is vele malen kleiner dan 68%, waardoor de berekende grenzen een betrouwbaarheidsinterval opleveren met een kans dat het gemiddelde tussen deze grenzen ligt vele malen groter is dan 68%.*

De enige manier om een juiste inschatting te maken van de betrouwbaarheidsgrenzen van het gemiddelde volume is het gebruik van realisaties uit de Sequentiële Gaussische Simulatie methode (SGS). Elke realisatie is immers een mogelijke, statistisch even waarschijnlijke, ligging van het laagvlak gebaseerd op de waarnemingen en de ruimtelijke correlatiestructuur: het variogram. Voor elk van deze realisaties wordt vervolgens het volume berekend dat zich tussen de verschillende vlakken, het maaiveld en de ingreep bevindt. Deze volumes worden gerangschikt naar grootte en worden in een grafiek weergegeven die de volume-risk curve wordt genoemd. Deze volume-risk curve (Figuur 6.14) geeft de kans weer dat het werkelijke volume kleiner is dan het berekende volume. Omdat de waarnemingen bij benadering normaal verdeeld zijn, is het mogelijk om een gemiddeld volume en tevens een standaard deviatie van het gemiddelde volume te berekenen.



Figuur 6.14 Voorbeeld van een volume risk curve voor het geschatte volume van de deklaag op basis van een set stochastische simulaties. De kans is uitgezet op de y-as, het bijbehorend volume op de x-as. In dit voorbeeld is het bepaalde volume van een ingreep met 90% zekerheid kleiner dan 1875.000 m³.



## 7 Risico-analyse van de resultaten van een grondonderzoek

Grondonderzoek is in dit handboek behandeld in de samenhang van grote projecten. De samenhang is vooral uitgewerkt in termen van randvoorwaarden en methodologie; de afhankelijkheid van grondonderzoek kent echter ook een risico-aspect. In dit hoofdstuk komen risico's aan de orde, waarbij de volgende tweedeling is gehanteerd:

- 1) uitvoeringsrisico's resulterend in vertraging van het grondonderzoek, met consequenties voor de planning van het gehele project.
- 2) risico's samenhangend met het gebruik van de resultaten van het grondonderzoek, zoals:
  - aannamen m.b.t. de bodemopbouw bij de planfase worden weersproken door de resultaten van meer gedetailleerd onderzoek, waardoor plannen en voorlopige ontwerpen moeten worden herzien;
  - het onderzoek blijkt bij toepassing niet het gewenste type resultaat te hebben opgeleverd (onvoldoende nauwkeurig, verkeerde gegevenstypen, etc.), waardoor evt. meer/ander onderzoek moet worden uitgevoerd;
  - onderzoeksconclusies met betrekking tot de verbreiding van grondsoorten blijken onjuist als het tot vergraven komt, wat consequenties kan hebben van uitvoeringsproblemen tot schadeclaims.

In de context van dit handboek worden alleen de risico's van grondonderzoek ten behoeve van de opsporing van bouwgrondstoffen belicht. Milieuchemisch bodemonderzoek of archeologisch onderzoek heeft specifieke eigen risico's voor uitvoering en interpretatie.

### 7.1 Risico's bij uitvoering van het grondonderzoek

De risico's bij de uitvoering van het grondonderzoek hangen samen met de verschillende uitvoeringsaspecten (Hoofdstuk 4). Op basis van een checklist voor projectrisico's volgens de risman systematiek [CUR, 2000b] is hieronder een overzicht opgenomen van risico's die uitloop van het grondonderzoek kunnen veroorzaken:

#### Technisch

- ontwerpwijzigingen maatregelen tijdens uitvoering grondonderzoek
- onjuiste inschatting hoeveelheid benodigd materiaal / monsterdichtheid
- tegenvallende prestatie van grondonderzoekbedrijven

#### Ruimtelijk

- aanwezigheid van obstakels of funderingsrestanten
- archeologische vondsten
- aanwezigheid kabels en leidingen
  - incompleetheid inventarisatie
  - geen medewerking kabels- en leidingeigenaren
- bijzonder klimatologische omstandigheden (langdurige vorst, storm, hoogwater)
- meer of zwaardere verontreiniging van de locatie
- kosten in verband met grondwaterbeschermingsgebieden
- bereikbaarheid bouwlocatie, werkruimte, beschikbaarheid stroom en water
- extra noodzakelijke hulpwerken en voorzieningen voor verkeer en veiligheid
- treffen van voorzieningen of maatregelen voor wegverkeer en scheepvaart.

### **Financieel**

- prijsstijging materialen hoger dan voorzien b.v. door overvragen markt
- tariefwijzigingen
- faillissement
- betaling declaraties niet tijdig
- geen/ geen goede financiële informatievoorziening

### **Maatschappelijk**

- ontbreken goede communicatie met omgeving, voorlichting en inspraakprocedures
- extra geluiddempende maatregelen tijdens uitvoering
- schadebeperkende maatregelen
- schade ten gevolge van werkzaamheden aan eigendommen van derden
- onvoldoende inschatten van voorzieningen of maatregelen voor wegverkeer en scheepvaart
- onvoldoende lokale medewerking, vertragende blokkades / acties van omwonenden

### **Politiek**

- niet/niet tijdig verkrijgen van publiekrechtelijke vergunningen en toestemming
- geen/onvoldoende inzicht in alle benodigde vergunningen
- ontbreken overeenstemming met gemeente(n), provincies, waterschappen e.d.

### **Juridisch**

- onvoldoende inzicht in alle wettelijke vereisten:
  - veiligheid / arbo, etc.
  - milieuriichtlijnen, geluid
  - aanbesteding
  - ontheffingen en vergunningen
- mogelijkheid van claims:
  - claims aannemer a.g.v. vertraging, uitloop etc.
  - claims gemeente a.g.v. niet nakomen afspraken of schade aan omgeving
  - claims omwonenden a.g.v. schade terrein / vee etc.
  - claims van andere belanghebbenden

### **Organisatorisch**

- wijzigen programma van eisen als gevolg van:
  - onduidelijkheid omtrent uitgangspunten
  - wijzigen projectdefinitie
- ontbreken projectprocedures
  - wijzigingsprocedure Plan van Eisen, planning, raming
  - opleverings/ -acceptatieprocedures
  - AO-procedures
  - aanbestedingsplan/ -procedure
  - gunningsprocedure
- onduidelijkheid omtrent eisen opdrachtgever, beheerder, gemeenten, provincies e.d.
- niet (tijdig) kortsluiten van afspraken met betrokken partijen
- ontbreken goede communicatie (intern/extern); communicatieplan
- ontbreken kwaliteitsplan
- onduidelijkheid over projectgrenzen
- geen/ onvoldoende afstemming tussen deelprojecten (intern)
- geen/ onvoldoende rekening houden met projecten in de omgeving
- gebrek aan benodigde mankracht op enig tijdstip:
  - problemen bij opzetten en inrichten projectorganisatie
  - wegvallen sleutelpersonen
  - wijzigen projectbemanning



- niet tijdig bestellen van materialen
- onjuistheid en onvolledigheid van de raming
- onvolledigheid of onzorgvuldigheid bij het opstellen van contractstukken.

## 7.2 Risico's bij toepassing van grondonderzoekresultaten

Om de risico's van toepassing van de grondonderzoekgegevens te kunnen overzien is het belangrijk om bij de uitvoering van het onderzoek alert te blijven op de uitwerking van de meest onnauwkeurige elementen binnen dat onderzoek op de betrouwbaarheid van het resultaat. Elke waarneming gebruikt voor het onderzoek (boring, sondering, geofysische metingen, maar ook de gebruikte geologische kaarten en profielen) hebben een eigen onnauwkeurigheid en beperking. De onzekerheid van een variabele die verkregen is volgens een bepaalde meettechniek, bestaat uit een combinatie van de onzekerheid in het meetsysteem (de technische specificaties) de natuurlijke (ruimtelijke) variabiliteit in de afzettingen die worden onderzocht en de onzekerheid in de interpretatie. Tabel 7.1 toont een indicatieve lijst van onnauwkeurigheden die samenhangen met de onderzoeksmethode en de wijze van interpretatie.

**Tabel 7.1: indicatieve lijst met onnauwkeurigheden bij de verschillende onderzoeksmethoden.**

Gemiddelde omrekenfactoren gehanteerd voor dichtheden per gebied.  
 Maximale resolutie van de beschikbare grids van de terreinhoogte ten opzichte van het maaiveld.  
 Nauwkeurigheid van de plaatsbepaling van de boring in x-, y- en z-richting.  
 Nauwkeurigheid van de bepaling van posities van monsternamen.  
 Nauwkeurigheid van korrelgrootte-analyses.  
 Nauwkeurigheid waarop laagscheidingen worden bepaald door de boorbeschrijver.  
 Resolutie van de gebruikte seismiek.

De mate waarin deze onzekerheden een rol spelen in de beantwoording van de onderzoeksvraag is belangrijk voor de keuze van de interpolatietechniek. Hierbij spelen de grootte van de locatie en de mate van detail ook een rol. Indien de interesse in eerste instantie uitgaat naar een gemiddelde waarde van een bepaalde parameter over een groter gebied, dan zal de niet-ruimtelijk gecorreleerde onzekerheid sterk worden uitgemiddeld. De metingen die gebruikt worden voor het bepalen van dit gemiddelde met behulp van de steekproef methode (Hoofdstuk 6.4) moeten dan wel een vergelijkbare nauwkeurigheid hebben. Bij een combinatie van meettechnieken is het belangrijk om te weten wat de onzekerheden zijn van de verschillende technieken en hoe de verschillende technieken onderling gecorreleerd zijn (zie Inzet 23). Het combineren van waarnemingen verkregen uit verschillende veldmethoden met ieder een eigen nauwkeurigheid is een gecompliceerde zaak die eigenlijk alleen met geostatistische interpolatietechnieken kan worden uitgevoerd. Tabel 7.2 geeft een indicatie van de bruikbaarheid van de interpretatiemethoden die in dit handboek besproken zijn en de mate waarin gegevens van verschillende methoden kunnen worden gecombineerd.

**Tabel 7.2: Inzetbaarheid van de in hoofdstuk 6 besproken interpretatiemethoden.**

	Steekproef	Interpolatie (o.a. Kriging)	Simulatie
Ruimtelijke informatie	-	+	++
Bruikbaar voor verschillende type data	-	+	++
Uitspraak over betrouwbaarheid	-	+	++
Complexiteit van de methode	++	+	-

**Inzet 23: Combinatie van boringen en geo-electriek bij het Grensmaasproject**

Bij de Grensmaas zijn naast boringen ook geo-electrische metingen uitgevoerd. Geoloog en geofysicus schatten samen op basis van deze gegevens de meest waarschijnlijke ligging van het laagvlak ter plaatse van de gemeten raai. Het is niet altijd mogelijk om de precieze ligging van het laagvlak te bepalen. De geschatte ligging kent een bepaalde onzekerheid. De onzekerheid bij een 'geo-electrisch bepaald' scheidingsvlak is groter dan de onzekerheid van 'een boring-bepaald' laagvlak. Binnen het Grensmaasproject is onderzocht of dit verschil in betrouwbaarheid mee te nemen is in de interpolatie door de geo-

electrische metingen als 'zachte' informatie te beschouwen. Het meenemen van de geo-electriek als zachte informatie bleek nagenoeg geen effect te hebben op de uiteindelijke ligging van het laagvlak. De enige manier om de geo-electrische metingen wel mee te laten tellen bij het geïnterpoleerde laagvlak is om ze gelijkwaardig ten opzichte van de boorgegevens te beschouwen. Omdat de geo-electriek belangrijke informatie geeft over de variatie in de ligging van het laagvlak over korte afstanden is, in samenspraak met de geologen, besloten om de geo-electrische waarnemingen even zwaar mee te tellen als een boring voor de bepaling van het variogram en de berekening van de ligging van het laagvlak

Tot besluit van het handboek is in Inzet 24 een voorbeeld van een risicoanalyse voor het delfstoffenaspect binnen het Maaswerkenproject opgenomen. Naast nauwkeurigheden en de foutenmarge van volumeschattingen aan winbare delfstoffen bleek achteraf ook de te hanteren dichtheid 10% onzekerheid op te leveren. Ten tijde van onderhandelingen zijn als gevolg van discussie over dichtheid variaties experimenteel in-situ dichtheden van grind op diverse locaties in het Grensmaas project bepaald (Figuur 7.1).

**Figuur 7.1**  
Dichtheidsbepaling van het toutvenant door in-situ met een Troxler apparaat de dichtheid van het toutvenant te bepalen. Na afloop van het grondonderzoek bleek verificatie van de te hanteren omrekenfactoren van volume naar massa toutvenant noodzakelijk.



**Inzet 24: Voorbeeld van een risico-analyse: de opbrengst van de te winnen delfstoffen**

Een project wordt geslaagd beschouwd als de hoofddoelstelling wordt gehaald, in het geval van De Maaswerken het realiseren van een grotere bescherming tegen overstromingen in het Maasdal. De ontwerpen van de ingrepen waren zodanig gedimensioneerd dat de kans op een overstroming van het Maasdal teruggebracht werd tot één keer per 1250 jaar. Deze kans wordt bepaald door de uit te voeren ingrepen binnen de rivierbedding en de effecten daarvan op de te verwachten extreem hoge waterstanden in de Maas. Wordt zo'n doel niet gehaald, dan is het project mislukt. Maar het Maaswerkenproject zou ook falen als de kosten van alle ingrepen hoger zouden uitvallen dan de baten. De faalkans van dit onderdeel wordt hieronder nader uitgewerkt.

**Het criterium:** de kans dat de kosten hoger zijn dan de opbrengsten moet kleiner zijn dan 10%.

**De invoerparameters:**

- volume winbaar materiaal (V) is 6.0 miljoen kubieke meter, variatie coëfficiënt = 5%
- aandeel verkoopbaar materiaal (Av) is 0.60, variatie coëfficiënt = 17%
- droge dichtheid (D) is 2,0 ton per kubieke meter, variatie coëfficiënt = 10%
- opbrengst (O) gesteld op EUR 6 per ton, variatie coëfficiënt = 8%
- kosten (K) gesteld op EUR 5 per kubieke meter, variatie coëfficiënt = 10%

**De som:**

- Baten =  $V \times A_v \times D \times O$
- Kosten =  $V \times K$
- Bepaal de kans dat de baten > kosten, ofwel de kans dat baten - kosten < 0

Indien alle parameters normaal verdeeld zijn, is de kans dat de kosten groter zijn dan de baten bij deze set gegevens ca. 5%. De grootste bijdrage aan de onzekerheid in de netto opbrengst is het aandeel 'verkoopbaar'. Indien deze variatie met de helft kan worden teruggebracht is de kans op verlies nog slechts 1%. Halveren van de onzekerheid in de droge dichtheid geeft een verdere reductie van de kans op verlies naar 0.5%. De onzekerheid in het te ontgraven volume speelt geen rol omdat deze zowel in de opbrengst als in de kosten een vergelijkbare rol speelt.

Andersom kan op basis van dezelfde analyse worden geconcludeerd dat de kans op winst 95% is! Het is dus erg belangrijk om duidelijkheid te krijgen wat het besliscriterium moet zijn.

Voor een goede inschatting van de nauwkeurigheid van het volume toutvenant is het volgende van belang:

- de gebruikte interpolatiemethode om een ruimtelijk dekkend beeld te genereren;
- de nauwkeurigheid van de gebruikte puntgegevens binnen de interpolatie; en
- het effect van verschillende definities die worden gebruikt om geologische pakketten te definiëren.



## Inhoud

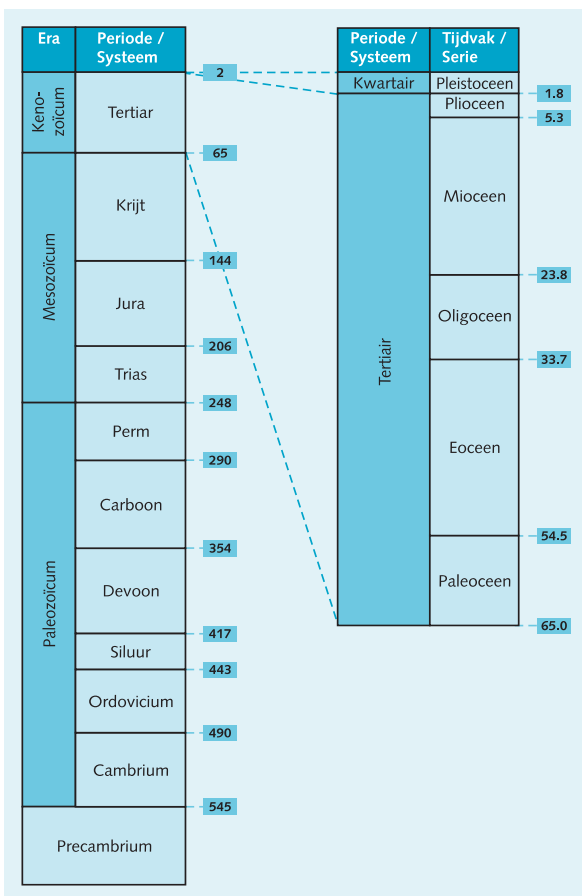
<b>A</b>	<b>Beknopt overzicht van de ondiepe geologie van Nederland</b>	71
<b>A.1</b>	<b>Inleiding</b>	71
<b>A.2</b>	<b>Nederland tijdens het Tertiair en het Kwartair</b>	72
<b>A.3</b>	<b>De belangrijkste afzettingen in Nederland</b>	74
	A.3.1 Inleiding	74
	A.3.2 Mariene afzettingen	76
	A.3.3 Fluviatiele afzettingen	78
	A.3.4 Glacigene afzettingen	79
<b>A.4</b>	<b>Overige afzettingen</b>	80



## A Beknopt overzicht van de ondiepe geologie van Nederland

### A.1 Inleiding

Om enig inzicht te krijgen in het voorkomen, de samenstelling en de verspreiding van de verschillende lagen in de Nederlandse ondergrond is het noodzakelijk om iets af te weten van de geologische ontwikkeling van Nederland. Deze bijlage geeft een korte inleiding in de recente geologische geschiedenis van Nederland en de verschillende soorten afzettingen die hierin zijn ontstaan. Voor de ondiepe ondergrond, de bovenste 150 meter van de Nederlandse bodem is vooral de recente geologische geschiedenis van belang. Met recent worden de periode van het Tertiair en het Kwartair uit de geologische tijdschaal bedoeld zoals afgebeeld in de rechterzijde van Figuur A.1. Het grootste deel van de recente geologische geschiedenis van Nederland heeft zich afgespeeld op de grens van land en water. Grootchalige bodembewegingen (opheffingen van het vaste land), zeespiegelveranderingen en klimaatwisselingen (bijvoorbeeld ijstijden) hebben er voor gezorgd dat de kustlijn zich regelmatig heeft verlegd. Gedurende bepaalde periodes lag de kust meer naar het oosten en het zuiden, lag Nederland dus onder water en hebben zich ondiepe of diepere mariene sedimenten en kustafzettingen gevormd. Bij een lage zeespiegel lag de kustlijn juist ver in de huidige Noordzee, vormde Nederland een grote delta met sedimenten aangevoerd door rivieren vanuit het oosten en het zuiden met afzettingen van verschillende oorsprong met een grote variatie aan samenstelling, herkomst en verspreiding.

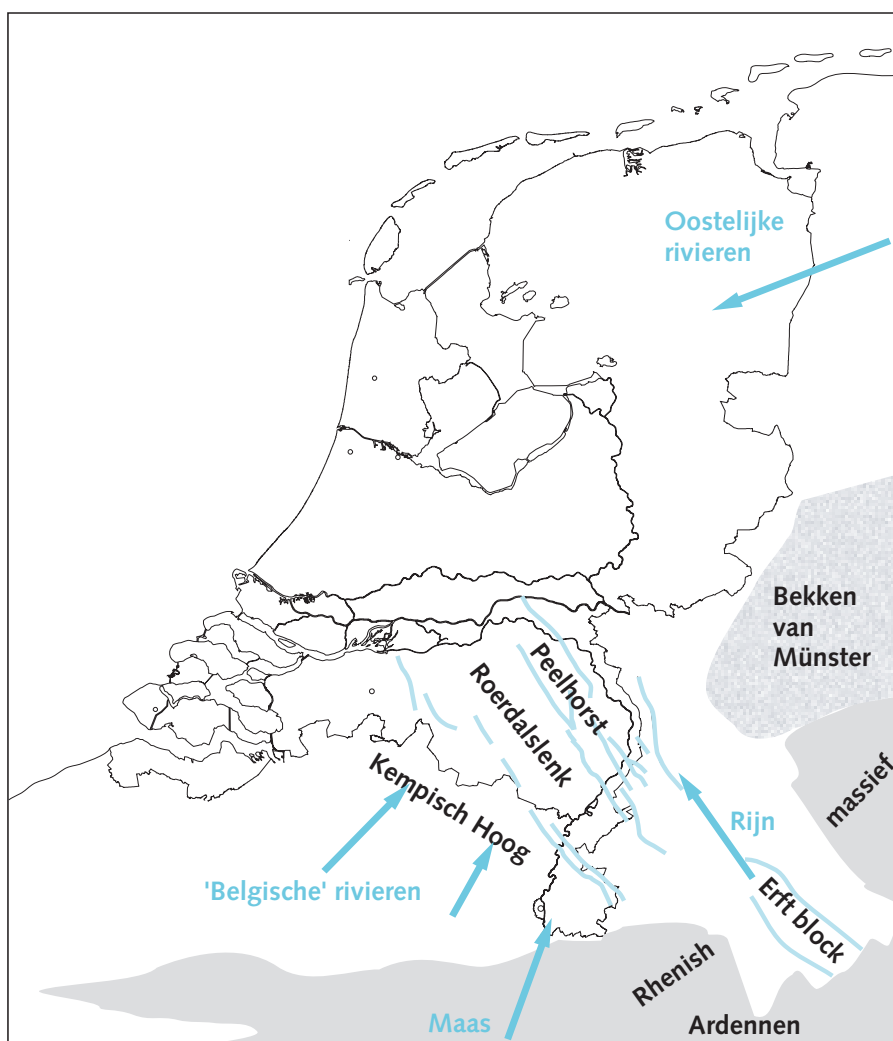


Figuur A.1 Geologische tijdschaal met de onderverdeling van de geologische geschiedenis vanaf het Cambrium in era's en periodes (ouderdommen van de overgangen in miljoen jaar). Aan het pakket gesteenten dat een periode vertegenwoordigt refereert men als systeem. Perioden zijn onderverdeeld in tijdvakken, systemen in series (hier alleen voor het Kenozoïcum). N.B. Het laatste tijdvak van het Kwartair, dat op deze schaal niet kan worden weergegeven, is het Holoceen (10.000 jaar geleden tot nu).



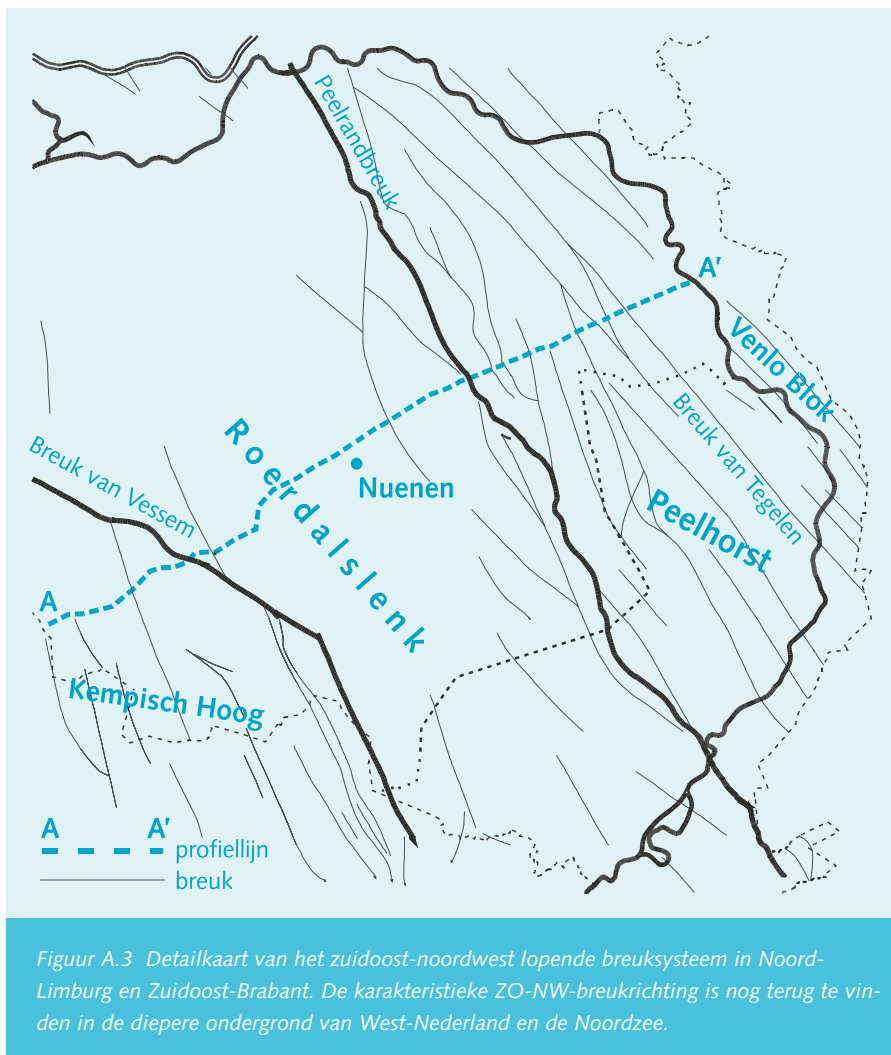
## A.2 Nederland tijdens het Tertiair en het Kwartair

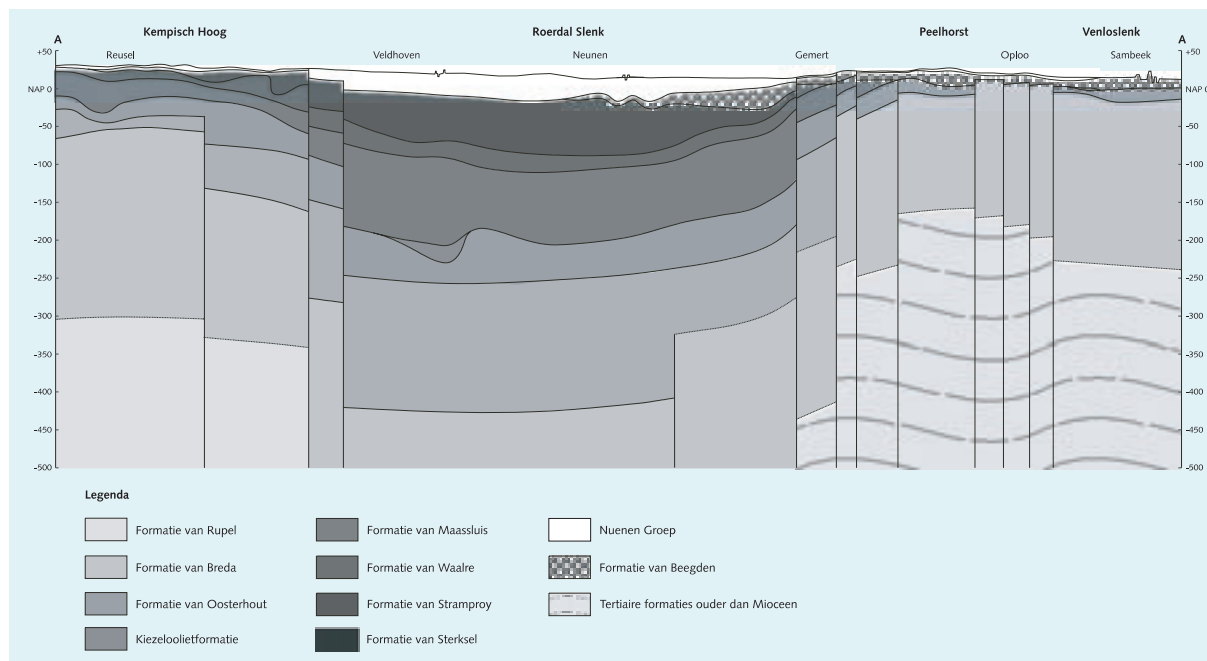
Geologisch gezien maakt Nederland deel uit van het zuidelijk deel van het Noordzeebekken, een in het Tertiair en Kwartair overwegend dalend gebied dat in het zuiden en oosten begrensd wordt door, relatief gezien, opgeheven oudere gebergtemassieven als de Ardennen en het Rijnse Massief (Zie Figuur A.2). Hieraan gerelateerd, komen vooral in het zuidelijk en oostelijk deel van Nederland, een groot aantal min of meer zuidoost-noordwest georiënteerde breuksystemen voor. Vrijwel heel Nederland maakte tijdens het grootste deel van het Tertiair deel uit van de zuidelijke Noordzee die zich tot ver over de landsgrenzen tot in België en Duitsland uitstrekte. Zo'n 10 miljoen jaar geleden begonnen rivieren vanuit het zuidoosten (Rijn, later ook Maas en Schelde) en het oosten (de Noord-Duitse rivieren Elbe, Weser en Ems) het zuidelijk deel van het Noordzeebekken met sediment op te vullen. De kustlijn schoof geleidelijk naar het noordwesten, kwam zo'n 1,5 miljoen jaar geleden westelijk van de huidige kustlijn uit en Nederland lag weer boven zeeniveau.



Figuur A.2 Tektonische kaart van Nederland met de belangrijkste geologische structuren. De breuksystemen in het zuidoosten, de opgeheven oudere massieven in lichtgrijs en twee grote riviersystemen: Rijn, Maas, Schelde vanuit het zuiden en de Noord-Duitse rivieren vanuit het oosten.

Dergelijke geologische processen verlopen niet continu in een vloeiende lijn; bodembewegingen en zeespiegelveranderingen gaan letterlijk op en neer. Als gevolg van die veranderingen is de verticale bodemopbouw in Nederland zeer afwisselend en complex met een afwisseling van zee- en landafzettingen. In Figuur A.3 zijn ook als voorbeeld de tektonische structuur (de breuken) van Oost-Brabant en Midden-Limburg aangegeven. In de Roerdalslenk, een gebied begreind door breuken dat gezakt is ten opzichte van zijn omgeving, heeft een sterke daling plaatsgevonden. De oostgrens van de Roerdalslenk wordt gevormd door de Peelrandbreuk. Deze breuk gaat kilometers diep en is ook nu (recent) nog steeds actief (aardbeving Roermond in 1992). Ten oosten van de Peelrandbreuk ligt de Peelhorst (een horst is een tektonisch opgeheven gebied) die sterk doorsneden is met breuken. Op de vereenvoudigde dwarsdoorsnede door de Roerdalslenk en de Peelhorst in Figuur A.4 is te zien dat grindige afzettingen van de formatie van Beegden in de Roerdalslenk (het gedaalde blok) op een diepte van meer dan 30 m liggen, terwijl dezelfde afzettingen op de Peelhorst (het omhooggekomen blok) dicht onder maaiveld voorkomen.





*Figuur A.4 Geologisch profiel door de Roerdalslenk en aangrenzende gebieden (de profiellijn A-A' is aangegeven in Figuur A.3). Het profiel is sterk door breuken doorsneden. In het profiel is duidelijk te zien dat de mariene Tertiaire formaties plaatselijk zeer dicht onder het oppervlak liggen (Peelhorst) en plaatselijk op grote diepte voorkomen in de Roerdalslenk die tektonisch gedaald is. De jongere Tertiaire en Kwartaire rivierafzettingen komen fragmentarisch voor op de Peelhorst, terwijl ze in de Roerdalslenk aanzienlijke diktes hebben bereikt.*

### A.3 De belangrijkste afzettingen in Nederland

#### A.3.1 Inleiding

De ondiepe ondergrond van Nederland is vrijwel volledig opgebouwd uit Tertiaire en Kwartaire afzettingen. Oudere (vaste) gesteenten komen alleen aan het oppervlak in Zuid-Limburg en zeer plaatselijk in het oosten van het land voor. Het betreft voornamelijk kalksteen van Mesozoïsche ouderdom. Deze afzettingen worden lithostratigrafisch (op grond van de samenstelling van het gesteente) onderverdeeld in formaties. Deze formaties zijn niet te vergelijken met de 'zachte' Tertiaire en Kwartaire afzettingen. Onderzoek aan dit soort kalksteenafzettingen vergt een afwijkende aanpak en wordt niet in dit handboek behandeld. Door het dalende Noordzeebekken komen deze afzettingen steeds dieper te liggen naar het noordwesten. De basis van het Tertiair (=top Krijt) bevindt zich onder de Noordzee op een diepte van zo'n 1300 meter.

De Tertiaire en Kwartaire afzettingen in Nederland bestaan vrijwel alleen maar niet-geconsolideerde (niet verkitte) sedimentaire afzettingen, d.w.z. afzettingen die opgebouwd zijn uit losse deeltjes die door rivieren aangevoerd zijn en in zee (marijn), in een rivier (fluviatiel) of door de wind (eolisch) afgezet zijn. Plaatselijk komen er dikke veenpakketten voor. De ijstijden vormen in Nederland een complicerende factor. Alle verschijnselen die daaraan gerelateerd zijn (landijs, stuwing, permanent bevroren ondergrond, etc.) hebben een grote invloed gehad op de vorming van nieuwe afzettingen en de versterking van bestaande sedimenten.

De Tertiaire en Kwartaire sedimenten in Nederland worden op grond van hun ontstaanswijze (genese) en herkomst in een vier categorieën verdeeld:

- De mariene sedimenten zijn afgezet in het (overwegend) dalende Noodzeebekken. De pakketten worden in noordwestelijke richting steeds dikker en zijn naar het noordwesten meer continu ontwikkeld. Strand-, duin- en kustvlakte-afzettingen horen ook tot de mariene afzettingen.
- De fluviatiele sedimenten zijn afgezet door de Rijn en de Maas en hun voorlopers (vanuit het zuiden en zuidoosten) en door een Baltische riviersysteem (vanuit het oosten).
- De glaciogene afzettingen zijn gerelateerd aan het landijs, dat zich uitstreckte tot Noord- en Midden-Nederland.
- De groep overige afzettingen behoort niet tot bovenstaande drie categorieën. Het betreft eolische afzettingen, veenpakketten en lokale tot regionale fluviatiele sedimentpakketten die ingeschakeld voorkomen in de grootschalige mariene, fluviatiele en glaciogene afzettingen.

Daarnaast kunnen nog er twee, afwijkende groepen van afzettingen genoemd worden:

- *De gestuwde afzettingen* bestaan uit afzettingen die feitelijk onder één van bovenstaande categorieën vallen, maar door de beweging van het landijs zijn 'opgerold' en verwrongen. De van oorsprong (sub-)horizontaal gelaagde afzettingen zijn door de druk van het landijs geplooid en vertonen uiterst complexe structuren (met sterk scheefgestelde lagen). De meest prominente gestuwde afzettingen zijn de stuwwallen van Midden- en Oost-Nederland (bijvoorbeeld de Utrechtse Heuvelrug). Er komen echter ook gestuwde afzettingen voor die niet direct morfologisch in het landschap waarneembaar zijn. In het Land van Maas en Waal bijvoorbeeld liggen lokaal gestuwde afzettingen (tot 30 meter dik) onder het vlakke maaiveld en het is bekend dat er in de buurt van Amsterdam begraven glaciale bekkens liggen. Door het verplooid van de oorspronkelijke sedimenten kan een pakket gestuwde afzettingen zeer heterogeen van samenstelling en structuur zijn. Onderzoek aan dit type afzettingen vraagt een speciale aanpak. In veel gevallen is intensief onderzoek noodzakelijk; met name hydrogeologisch onderzoek aan deze afzettingen is complex, omdat de scheefstelling van de lagen grote invloed heeft op de hydrogeologische omstandigheden.
- *Afzettingen onder oppervlaktewater* zijn in feite een kunstmatige klasse. Het gaat om afzettingen op de bodem van het oppervlaktewater. Volgens de normale stratigrafische principes zijn ze in te delen bij één van de vier (naar ontstaanswijze gerangschikte) groepen. Het zijn echter meestal zeer recent gevormde afzettingen waarbij de invloed van menselijk ingrijpen een belangrijke rol speelt. Met name valt te denken aan slib en afzettingen van een mobiele (transport)laag in rivierbeddingen. Door menselijke ingrepen aan de loop, de ligging en de afvoer van rivieren en beken zijn deze afzettingen niet goed te vergelijken met die van natuurlijke systemen. De hele zone van zomer- en winterbed valt in feite onder deze klasse. Ook in het winterbed zijn de natuurlijke processen recentelijk sterk beïnvloed door de mens (bijvoorbeeld door bedijking). De bodemopbouw kan dan ook sterk afwijken van een natuurlijke opbouw. Ook de slibrijke afzettingen in voormalige zand- en grindwinputten horen bij deze groep. Als er bodemonderzoek uitgevoerd moet worden in afzettingen uit deze groep, dan moet er rekening gehouden worden met afwijkende fenomenen. Dit onderzoek vraagt veelal om een aangepaste methodiek.

Het is heel goed mogelijk dat er tijdens een onderzoek, afhankelijk van de locatie en de diepte van het interessegebied, een bodemopbouw gevonden wordt waarin afzettingen van verschillende categorieën voorkomen. De vier hierboven genoemde, genetisch samenhangende, groepen van afzettingen worden nu nader beschreven. Figuur A.5 geeft een overzicht van de formaties en hun verschillende afzettingsmilieus.

Mariene afzettingen	Fluviatiele afzettingen		Glacigene afzettingen	Overige afzettingen	
Formatie van Naaldwijk		Formatie van Echteld		Formatie van Nieuwkoop	
		Formatie van Kreftenheye		Formatie van Twente	
Eem Formatie		Formatie van Urk	Formatie van Drente	Formatie van Asten	
		Formatie van Sterksel	Formatie van Peelo	Formatie van Eindhoven	Formatie van Naaldwijk
	Formatie van Appelscha	Formatie van Waalre		Formatie van Stramproy	
Formatie van Maassluis	Formatie van Peize	Kiezeloöiet Formatie			
Formatie van Oosterhout				Ville Formatie	
Formatie van Breda					
Formatie van Veldhoven					
Rupel Formatie					
Formatie van Tongeren					
Formatie van Dongen					
Formatie van Landen					

■ Baltische Groep  
■ Rijn Groep  
■ Lopik Subgroep (Rijn Groep)  
■ Maas Groep  
■ Nuenen Subgroep

Figuur A.5 Overzicht van Tertiaire en Kwartaire formaties naar Weerts et al. [(2000)].

### A.3.2 Mariene afzettingen

Over vrijwel heel Nederland en het aangrenzende deel van het continentale plat is een opeenvolging te vinden van mariene sedimenten van Tertiaire en Kwartaire (Onder Pleistoceen) ouderdom (Formatie van Landen tot en met Formatie van Maassluis).

Mariene sedimenten komen in heel Nederland voor en werden afgezet op een diepte variërend van enkele meters tot enkele honderden meters. De dikte van deze pakketten neemt, van slechts enkele meters in Zuid-Limburg, toe tot meer dan 2000 m in het noordelijke offshoregebied. Het afzettingmilieu (van het 'echte' diep-water mariene milieu met weinig sediment tot het kustnabije milieu met ondiep water en een wisselend sedimentaanbod) wordt daarbij gestuurd door wereldwijde zeespiegelbewegingen en de aanvoer van sediment vanuit het achterland. Grootschalige zeespiegelbewegingen bepalen de grens tussen land en zee daarmee het afzettingmilieu in de kustzone. De aanvoer van sediment met de rivieren is afhankelijk van bewegingen van het achterland. Treedt daar opheffing plaats, dan zullen de rivieren meer sediment naar zee vervoeren.

Op grond van hun lithologische kenmerken (de aanwezigheid van het mineraal glauconiet, schelpen en schelpgruis van mariene oorsprong) zijn deze klastische mariene

afzettingen over het algemeen relatief gemakkelijk te herkennen. Er is een duidelijke afwisseling van zand- en kleilagen. De mariene afzettingen van Tertiaire ouderdom liggen over het algemeen op enige diepte in de ondergrond. Op grond van duidelijk herkenbare, seismische grenzen die in het gehele sedimentatiebekken terug te vinden zijn is een indeling gemaakt in formaties. Een deel van deze mariene formaties is onderverdeeld in laagpakketten. Voor een korte karakterisatie hiervan wordt verwezen naar [Weerts et al., 2000].

Aan het begin van het Kwartair komt een groot deel van de Noordzee droog te liggen. Het wordt kouder; de ijskappen op de Noord- en Zuidpool groeien aan en de zeespiegel daalt. De kustlijn komt ver in de Noordzee buiten de huidige kuststrook te liggen en ook Nederland ligt boven water. Er komen dan ook geen mariene afzettingen voor in Nederland uit die periode. Gedurende het grootste deel van het Pleistoceen worden de afzettingen in Nederland door rivieren afgezet (de fluviaatle afzettingen). Pas vanaf het Eemien (Laat Pleistoceen) tot in het Holoceen komt Nederland weer tijdelijk beneden zeeniveau te liggen en worden er op grote schaal weer mariene sedimenten binnen de huidige kustlijn afgezet. In Nederland zijn in die periode twee herkenbare, karteerbare, Kwartaire mariene afzettingen afgezet: de Eem Formatie en Formatie van Naaldwijk. Binnen beide formaties is het mogelijk om, op grond van hun lithologische samenstelling en stratigrafische positie, een verdere onderverdeling te maken in laagpakketten. Op basis van het afzettingsmilieu en ouderdom kunnen de mariene afzettingen worden onderverdeeld in Tertiaire en Kwartaire ouderdom.

*Tertiaire mariene afzettingen* bestaan voornamelijk uit sterk kleihoudende of kleiige sedimenten afgewisseld met fijne tot matig fijne zanden. De overgangen (in samenstelling en eigenschappen) tussen laagpakketten zijn meestal geleidelijk. Lokaal zijn er effecten van postgenetische processen (veranderingen in het sediment na afzetting) te vinden, zoals bijvoorbeeld verkittingen.

De kust- en strandafzettingen die gelijktijdig met de mariene Tertiaire afzettingen gevormd zijn, zijn aanzienlijk complexer van opbouw. De lithologische overgangen tussen de laagpakketten zijn meestal abrupter. Dit soort kustnabije afzettingen komt natuurlijk alleen voor aan de randen van het verbreidingsgebied van de Tertiaire zee en worden voornamelijk in het zuidelijk en oostelijk deel van Nederland aangetroffen. In oppervlakte nemen de Tertiaire kustafzettingen maar een klein deel in beslag in vergelijking met de overige Tertiaire mariene afzettingen. Bij de mariene Tertiaire afzettingen vergt de aanwezigheid van glauconiet extra aandacht. Glauconiet (een ijzersilicaat) komt op uitgebreide schaal voor, met name in de Miocene Formatie van Breda. Het mineraal heeft het uiterlijk van kleine (zand)korrels, maar heeft kenmerken die sterk overeenkomen met kleimineralen. Zo hebben sterk glauconiethoudende zanden specifieke geotechnische eigenschappen. Ook geochemisch gezien heeft het mineraal bijzondere eigenschappen. Glauconiet kan van nature een relatief hoog gehalte aan arseen en ander zware metalen hebben. Bij werkzaamheden waarin grondverzet gaat plaats vinden, betekent de aanwezigheid van dergelijke afzettingen veelal een extra onderzoeksinspanning.

*Kwartaire mariene afzettingen* zijn in hoofdzaak dichtbij de kust en in getijdenmilieus gevormd, maar komen ook voor als opvulling van glaciële dalen en bekkens. De dikte van deze mariene afzettingen kan over korte afstand aanzienlijk variëren. De sedimenten zijn dicht onder de kust afgezet; een kust die steeds verschoof door zeespiegel-dalingen en -stijgingen (door ijstijden en interglacialen) en dan ook een steeds wisselend afzettingsmilieu vormde. Ook qua samenstelling wordt deze groep mariene afzettingen gekenmerkt door een grote verscheidenheid. Zo komen kleihoudende lagunaire en wadafzettingen op korte afstand van zandige strand- en duinafzettingen voor. De opvullingen van fossiele getijdengeulen die bij deze groep van afzettingen horen, variëren eveneens van klei tot zand. Dergelijke fossiele getijdengeulen zijn

enkele meters tot enkele honderden meters breed. Deze geulsystemen kunnen zich meer dan 30 m ingesneden hebben. Een gedegen kennis hierover is van belang omdat de insnijdingen het grensvlak met de onderliggende, veelal fluviatiele, afzettingen sterk verstoord hebben en dat kan een zeer grillig diepteverloop tot gevolg hebben. De twee belangrijkste mariene afzettingen uit het Kwartair zijn de Eem Formatie (ca. 125.000 jaar geleden ontstaan) en de jongere Formatie van Naaldwijk (Holoceen, maximaal 7000 jaar oud). Het vergt veel onderzoek om deze mariene afzettingen in kaart te brengen. Er is echter al een aanzienlijke hoeveelheid geologische kennis beschikbaar om dergelijke afzettingen, met fenomenen zoals diepe getijdengeulen, in kaart te brengen.

### A.3.3 Fluviatiele afzettingen

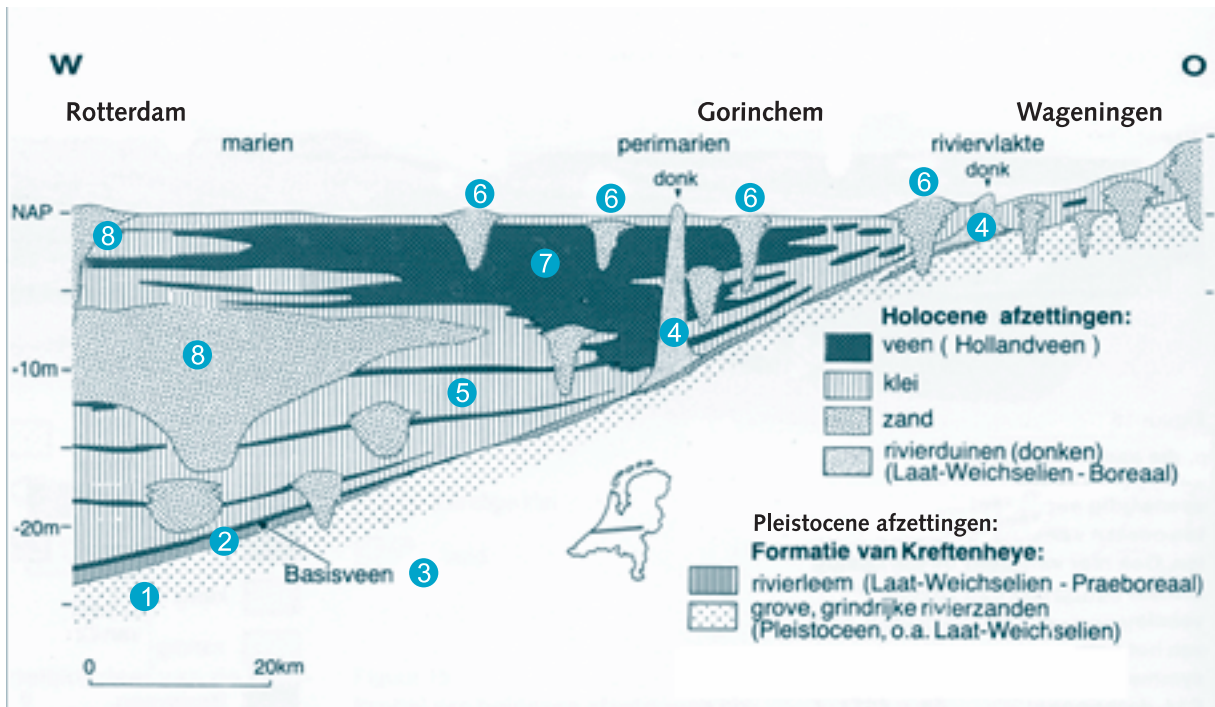
Aan de oostelijke en zuidoostelijke rand van het Noordzeebekken komen tegen het einde van het Mioceen twee deltasystemen tot ontwikkeling, waarin de rivieren zand, grind en klei afzetten. Eén systeem breidt zich vanuit het noordoosten uit in westelijke richting over Nederland en het aangrenzende deel van het Noordzeebekken. Dit systeem voert sediment aan vanuit de Noord-Duitse laagvlakte en het Baltisch gebied. Een tweede systeem ontwikkelt zich vanuit de Nederrijnse Laagvlakte in noordwestelijke richting. In het Laat Mioceen en Pliocene voert dit systeem sediment aan uit het omhoogkomende Rhenish-massief via voorlopers van Rijn en Maas. Vanaf het Laat Pliocene vindt via de Rijn ook aanvoer van sediment vanuit Zuid-Duitsland plaats. De Rijn en de Maas hebben ieder een eigen herkomstgebied. De afzettingen van beide rivieren zijn dan ook van elkaar te onderscheiden op grond van verschillen in samenstelling. De fluviatiele afzettingen zijn, op basis van de herkomst van het sediment, verdeeld in drie groepen: de Baltische Groep, de Rijn Groep en de Maas Groep (Zie Figuur A.5).

De rivierafzettingen in Nederland zijn vooral gevormd door laaglandrivieren die uitmondden in een kustvlakte. De lithologische samenstelling van rivierafzettingen kan sterk uiteenlopen van grof grind tot zand en klei. Over het algemeen is de gemiddelde korrelgrootte van rivierafzettingen duidelijk grover dan die van mariene afzettingen. In rivierafzettingen komen vaak de zogenaamde 'fining upwards' sequenties voor die in ideale vorm van onderen naar boven bestaan uit een opeenvolging van grof zand en grind (eventueel met stenen afgezet in de geulbodem) met daarboven matig grove tot matig fijne zanden die, meestal geleidelijk, overgaan in kleiige afzettingen. In de praktijk zijn dit soort opeenvolgingen vaak incompleet omdat een deel is weggeërodeerd.

Naast de drie hoofdgroepen (Baltisch, Rijn en Maas) worden de fluviatiele afzettingen onderverdeeld in formaties. De lithologische kenmerken en de stratigrafische positie van de pakketten vormen daarbij de belangrijkste criteria. De meeste grofkorrelige rivierzanden behoren tot de Formatie van Kreftenheye en de Formatie van Urk. Indien mogelijk worden binnen de formaties laagpakketten onderscheiden.

Een onderzoek naar de samenstelling, diepte en verbreiding van fluviatiele afzettingen vraagt om een gerichte aanpak. Over het algemeen is de benodigde onderzoekintensiteit om dit type afzettingen goed in beeld te brengen, relatief hoog. Dit wordt in belangrijke mate veroorzaakt voor de grote variabiliteit in samenstelling en verbreiding van fluviatiele afzettingen. Figuur A.6 geeft een indruk van de verschillende afzettingen van het riviereengebied van Wageningen tot Rotterdam.





Figuur A.6 Globale geologische opbouw van het rivierengebied van Wageningen tot Rotterdam. Het profiel is een bewerking van Zagwijn [1991]. De verschillende afzettingen zijn van oud naar jong genummerd. Tussen haakjes staan de namen van de geologische formaties aangegeven waartoe de afzettingen behoren (zie Figuur A.5).

Pleistocene pakket: 1 grote rivierzanden (Formatie van Kreftenheye); 2 Kleilaag van Wijchen (Formatie van Kreftenheye) tussen het Pleistocene zand en de Holocene deklaag.

Holocene pakket: 3 inschakeling van basisveen (Formatie van Nieuwkoop); 4 rivierduinzand (Formatie van Twente); 5 klei (Formatie van Naaldwijk / Formatie van Echteld); 6 rivierzand in oude stroomgeul (Formatie van Echteld); 7 veenlaag van Hollandveen (Formatie van Nieuwkoop) afgezet tijdens het verondiepen van oude stroomgeul; 8 zandige getijdegeul afgezet onder mariene invloed (Formatie van Naaldwijk).

#### A.3.4 Glacigene afzettingen

Tijdens het Midden en Laat Pleistoceen werd het noordelijk deel van Nederland door landijs bedekt. De afzettingen die onder invloed van het landijs worden gevormd noemt men glacigene afzettingen. Deze afzettingen komen dus enkel voor in Noord- en Midden-Nederland. Glaciale sedimentatieprocessen vinden voor een deel plaats onder extreme fysische omstandigheden waardoor unieke combinaties van grondsoorten ontstaan die in opbouw sterk verschillen van bijvoorbeeld rivierafzettingen. Glacigene afzettingen worden op grond van hun stratigrafische positie in twee formaties onderverdeeld, de Formatie van Peelo en de Formatie van Drente. Binnen de groep glacigene afzettingen worden, gebaseerd op de afzettingssomstandigheden, drie typen onderscheiden:

- **Glaciofluviale afzettingen** zijn gevormd door smeltwater afkomstig van het landijs en zijn dichtbij het ijsfront gesedimenteerd. Dit type sediment wordt afgezet in puinwaaiers, als min of meer vlakliggende sedimentlichamen of in (diepe) erosiegeulen uitgeschuurd door het landijs. De glaciofluviale afzettingen kunnen in dikte variëren van enkele meters tot meer dan 200 à 300 meter. Deze afzettingen zijn

qua korrelgrootte zeer variabel. Naast zand en grind kunnen ook grotere stenen, keien en blokken voorkomen. Over het algemeen zijn deze sedimenten door snelstromend water afgezet en komt er weinig fijn materiaal in voor. Door de slechte sortering is er een gerichte onderzoeksstrategie hard nodig om een gedetailleerd beeld van de samenstelling van de afzetting te krijgen. Bij boringen in dit type sediment dient rekening gehouden te worden met de mogelijkheid dat er lokaal zeer grof materiaal kan voorkomen.

- *Glaciolacustriene afzettingen* zijn over het algemeen fijnkorrelige sedimenten (klei en leem) die met name afgezet zijn in depressies in de ondergrond die door het ijs gevormd zijn. De vorming van deze sedimenten hangt veelal samen met de afsmeltingsfasen van het landijs. Glaciolacustriene afzettingen hebben een relatief constante samenstelling; de laagpakketten zijn goed te karteren. Plaatselijk kunnen er grovere zand en grindlagen in de kleien voorkomen; sporadisch zijn er grote stenen of keien ('dropstones') in de klei of leem aanwezig. De dikte van deze afzettingen loopt uiteen van enkele meters tot meer dan 50 meter. Een bijzondere variant van deze afzettingen is de zogenaamde potklei. Deze klei komt alleen in Noord-Nederland voor en kan meer dan 100 m zijn. Potklei kan extreem compact zijn en komt voor in geulvormige structuren.
- *Grondmorenes* zijn de direct onder het landijs afgezet. Het sediment bestaat uit een mengsel van klei, leem, zand, grind, stenen en blokken. Over het algemeen zijn het compacte en stevige afzettingen. De dikte van deze pakketten varieert van 1 m tot ca. 25 m. Deze afzettingen zijn goed te karteren, maar door de aanwezigheid van stenen, keien en blokken zijn niet alle onderzoeksmethoden te gebruiken in deze afzettingen.

#### A.4 Overige afzettingen

De 'eenheid overigen' bestaat uit eolische afzettingen, lokaal tot regionaal afgezette fluviatiele sedimenten en veen/bruinkool. Een belangrijk deel van deze groep afzettingen is gevormd onder periglaciale omstandigheden, dat wil zeggen onder zulke omstandigheden dat de ondergrond permanent tot op grote diepte bevroren was. Binnen de groep overige afzettingen wordt op basis van de ontstaanswijze de volgende onderverdeling gemaakt.

*Eolische afzettingen* zijn door de wind gevormd. Binnen deze afzettingen wordt een onderverdeling gemaakt in löss en dekzand.

- *Löss* bestaat uit gesorteerde leem met lokaal bijmengingen van klei en/of zand. Löss komt in bijna geheel Zuid-Limburg vanaf maaiveld voor. De dikte kan oplopen tot circa 25 meter. Het is een typische windafzetting, goed gesorteerd met een hoog gehalte aan silt. Lokaal komen humeuze en kleiige bodemhorizonten in de löss voor. De afzettingen zijn goed te karteren; de grootste variatie zit in de dikte die over korte afstand sterk kan veranderen.
- *Dekzanden* zijn eveneens door de wind gevormd en bestaan uit goed gesorteerde matig fijne zanden. Ze komen vooral in de zandgebieden van Nederland vanaf maaiveld voor. De dikte loopt uiteen van minder dan 1 m tot, plaatselijk, meerdere meters.

*Fluvioperiglaciale afzettingen* zijn afzettingen van kleinschalige fluviatiele systemen die zijn afgezet onder periglaciale omstandigheden in kleinere beek- en riviersystemen. De lithologische samenstelling varieert van klei en leem tot zand en grind. Matig fijn tot matig grof zand vormt echter het overgrote deel van dit type sediment. In de beeksystemen komen klei, leem en veen vooral aan de top (maaiveld) voor, maar ook in de verticale opeenvolging kunnen lemige lagen in deze sedimenten voorkomen. Over korte afstand kan de lithologische sterk variëren. Onderzoek op regionale schaal aan dit type afzettingen is veelal met een relatief geringe inspanning mogelijk. Indien

er op lokale schaal informatiebehoefte is, dan zal met een behoorlijke onderzoeksintensiteit rekening gehouden moeten worden. Met name grondwaterstromingen zijn in dit type afzettingen zeer complex.

*Veen en bruinkool* komen zowel aan de oppervlakte als in de ondergrond voor. Het betreft organische materiaal dat ontstaan is door opeenhoping van plantenresten in een zuurstofarm milieu. Veen en bruinkool (sedentaten) komen als inschalingen voor in diverse andere eenheden. Veen of bruinkoollagen kunnen in uitgestrekte arealen voorkomen en zijn dan goed karteerbaar. Vaak zijn echter, door latere erosie, delen van het oorspronkelijke veen verdwenen en laten de nog aanwezige resten een onregelmatig verspreidingspatroon zien. Veen- en bruinkoolafzettingen hebben specifieke (geotechnische en hydrologische) eigenschappen. Op de grens met boven- of onderliggende sedimenten komen vaak bijzondere aanrijkingen van chemische elementen voor (o.a. zwavel, arseen e.d.). De dikte van de lagen kan zeer sterk wisselen en varieert van enkele centimeters tot een tiental meters. Het vaststellen van de aanwezigheid van veen of bruinkool zal vaak tot extra onderzoeksinspanningen leiden.



## Inhoud

<b>B</b>	<b>Boormethoden en sonderingen</b>	85
<b>B.1</b>	<b>Inleiding</b>	85
<b>B.2</b>	<b>Handboringen</b>	86
B.2.1	De Edelmanboor	86
B.2.2	De gutsboor	87
B.2.3	De Van der Staay zuigboor	87
B.2.4	De handpulsboring	88
<b>B.3</b>	<b>Mechanische boringen met verbuisd boorgat</b>	89
B.3.1	Pulsboringen	89
B.3.2	Ackermann boringen	90
B.3.3	Counter flush boringen	90
B.3.4	De holle avegaarboring	91
B.3.5	Knijperboringen	91
<b>B.4</b>	<b>Mechanische boringen met open boorgat</b>	92
B.4.1	Roterend boren	92
B.4.2	Niet roterend boren	94
<b>B.5</b>	<b>Sonderingen</b>	95
<b>B.6</b>	<b>Boren en sonderen op water</b>	97
B.6.1	Inleiding	97
B.6.2	Speciale boortechnieken voor waterbodems	98
<b>B.7</b>	<b>Erkende boorbedrijven</b>	99



## B Boormethoden en sonderingen

### B.1 Inleiding

Deze bijlage beschrijft de gangbare boormethoden en sonderingstechnieken die gebruikt worden bij grondonderzoek. Boringen geven, door het materiaal dat naar boven gebracht wordt, informatie over de samenstelling en de structuur van de ondergrond. Deze bijlage behandelt achtereenvolgens boormethoden die met de hand of machinaal worden uitgevoerd. Boringen die dieper gaan dan enkel meters worden bijna altijd machinaal uitgevoerd. Verder zijn de boormethoden in twee soorten te verdelen. Gekernde boringen leveren een gestoken monster op dat relatief ongeroerd is. Daarentegen leveren spoelboringen geroerd monstermateriaal op dat mee naar boven komt met de boorspoeling. Naast grondboormethoden zijn sonderingen een efficiënte manier om scheidingsvlakken tussen verschillende grondsoorten in beeld te brengen. Bij sonderingen wordt een massieve of holle punt in de grond geduwd. De kracht die nodig is om de punt (de cone) naar beneden te duwen is een maat voor de samenstelling van de bodemlaag. Sonderingen zijn sneller en goedkoper uit te voeren dan boringen, ze kunnen gebruikt worden om meetpunten van boringen te verdichten. De boorlocatie en de onderzoeksvraag bepalen voor een groot deel de techniek die toegepast wordt. Tabel B.1 geeft een overzicht van de specificaties van boringen die in deze bijlage worden beschreven.

**Tabel B.1: overzicht van de verschillende boormethoden die in Nederland gebruikt worden.**

Boormethode	Hand of mechanisch	Doorloop- tijd [m/dag]	Richtprijs [EUR/m]	Monster- name	Steken?	Onder/boven grondwater- Spiegel?	Max. diepte [m]	Geschikt voor:			Kwaliteit monsters
								Zand	Klei/veen leem/löss	Grind	
Edelman (zand)	H	30	28-33	Geroerd	n.v.t.	Boven	5	++	+	-	+
Edelman (klei)	H	25	28-33	Geroerd	n.v.t.	Boven	5	+	++	-	+
Riverside	H	10	55-65	Geroerd	n.v.t.	Boven	5	+	+	++	+
Grindboor	H	10	55-65	Geroerd	n.v.t.	Boven	5	-	-	++	+
Edelman (combi)	H	25	28-33	Geroerd	n.v.t.	Boven	5	++	+	-	+
Guts	H	50	33-37	Ongeroerd	Ja.	Onder	15	-	++	-	++
VdStaay	H	30	55-65	Geroerd	n.v.t.	Onder	5	++	-	-	++
Handpuls	H	15	90-125	Geroerd	ja	Onder	10	++	-	+	+
Puls	M	6	90-150	Geroerd	ja	Onder	tot 120	++	-	++	+
Ackermann-puls	M	4-6	270-330	Ongeroerd	ja	Onder	tot 120	++	++	-	++
Kernboren	M	2	-	Ongeroerd	ja	Beide	>100	++	++	-	++
holle avegaar	M	4-6	270-320	Ongeroerd	ja	Beide	tot 40	+	++	-	++
Straight flush	M	40	60-85	Geroerd	Nee	Beide	>100	++	-	+	-
Counter flush	M	40	70-90	Geroerd	ja	Beide	80-100	++	++	+	+
Zuigboor-luchtlift	M	40	70-80	Geroerd	ja	Beide	>100	++	+	++	+
Ramguts	M	30	45-70	Ongeroerd	Nee	Beide	tot 20	+	+	-	+
Avegaar	M	30	45-70	Geroerd	Nee	Beide	tot 10	+	+	+	+
Begemann	M	40	90-160	Ongeroerd	ja	Beide	tot 20	+	++	-	++

- slecht, + matig, ++ goed

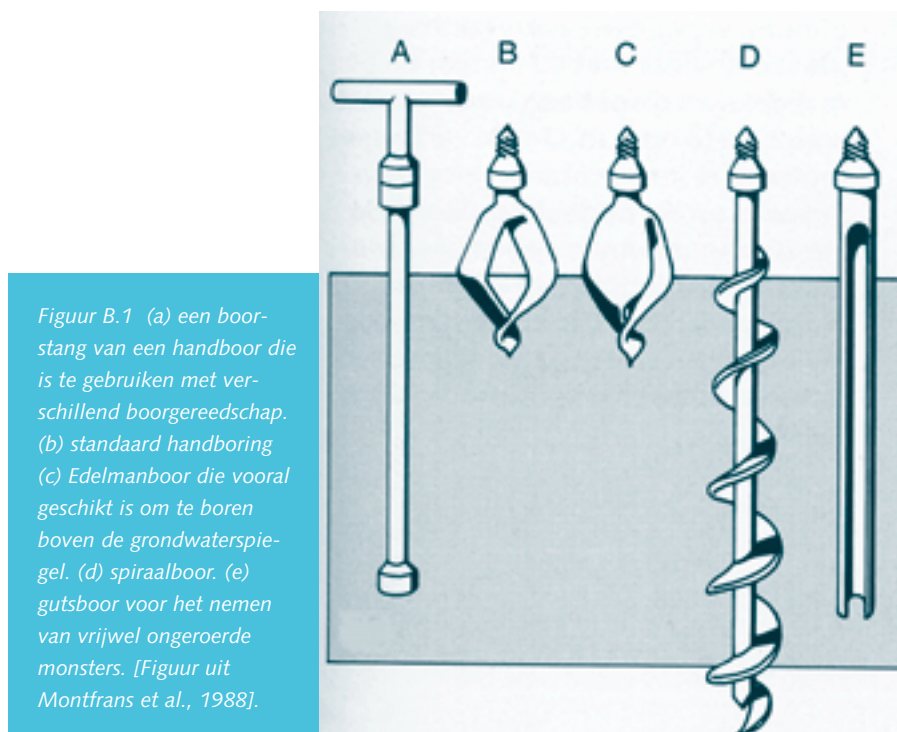


## B.2 Handboringen

Met handboorgereedschap kan afhankelijk van de bodemsamenstelling tot circa 10 meter diep worden geboord. Op een standaard boorstang (Figuur B.1a) kunnen verschillende boorkoppen worden gezet. (Figuur B.1b toont de standaard handboor. Wanneer de boring op diepte is kan men de boorstang verleggen met tussenstukken en verder boren.

### B.2.1 De Edelmanboor

De Edelmanboor is beschikbaar in vele maten en varieert in diameter van 2 tot 25 centimeter. Deze boor is alleen te gebruiken boven de grondwaterspiegel. De monsters die met de Edelmanboor opgeboord worden zijn geroerd, dat wil zeggen verstoort, zodat de oorspronkelijke gelaagdheid niet meer te zien is (Figuur B.1c). De boor kan telkens met stangen van 0.5 of 1 meter verlengd worden. De normale Edelmanboor bestaat in vier types: de kleiboor, de zandboor, de combinatieboor, en de riversideboor. Handboren in grind gaat erg moeilijk. In stugge, droge bodems en grindhoudend zand is de riversideboor de beste keuze. Deze boor is speciaal ontwikkeld voor grindrijke grond. Het is niet mogelijk om met een Edelmanboor onder de grondwaterspiegel te 'hand'boren. Voor dit traject zijn diverse andere boormethodes beschikbaar zoals de spiraalboor (Figuur B.1d) en de gutsboor (Figuur B.1e).



Figuur B.1 (a) een boorstang van een handboor die is te gebruiken met verschillend boorgereedschap. (b) standaard handboring (c) Edelmanboor die vooral geschikt is om te boren boven de grondwaterspiegel. (d) spiraalboor. (e) gutsboor voor het nemen van vrijwel ongeroerde monsters. [Figuur uit Montfrans et al., 1988].

### B.2.2 De gutsboor

Wanneer de grondwaterspiegel bereikt is met een Edelmanboor, kan de boring voortgezet worden met een guts. De guts is een holle ijzeren staaf met een scherpe onderkant, die in de lengterichting doorgesneden is (Figuur B.1e). Wanneer het monster boven de grond is, wordt in de lengterichting van de guts, van boven naar onder, de helft van het monster afgesneden, zodat een continu profiel verkregen wordt. In de eerste meters van de boring kunnen lengtes van 1 meter lengte gestoken worden. Op grotere diepte is het raadzaam kortere trajecten te nemen. In die gebieden waar de bovengrond uit klei en veen bestaat, is het mogelijk om met de gutsboor ongevoerde monsters te steken tot 10-15 meter diepte. De ervaring van de boorploeg bepaalt de betrouwbaarheid en het dieptebereik van de gutsboring. Dit type boor kan zowel onder als boven de grondwaterspiegel gebruikt worden. De guts levert een relatief klein monster dat veelal niet toereikend is voor bijvoorbeeld milieukundige analyses.

### B.2.3 De Van der Staay zuigboor

Een boring in zandige grond kan onder de grondwaterspiegel het best uitgevoerd worden met een Van der Staay zuigboor. Deze boor wordt vooral gebruikt om in zandlichamen te boren. Klei-, leem- of veenlagen leveren in praktijk problemen op. In dat geval kan de boring beter voortgezet worden als gutsboring.

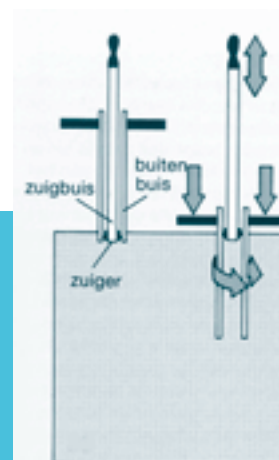
De Van der Staay zuigboor bestaat uit twee PVC pijpen die in elkaar kunnen schuiven (Figuur B.2). Aan de onderkant van de binnenste buis is een leertje bevestigd zoals in een fietspomp. Aan de bovenkant van de buitenpijp zit een dubbel handvat en op de bovenkant van de binnenpijp zit ook een handgreep. De boring moet worden uitgevoerd met twee personen. Nummer 1 drukt de buitenpijp in de grond en tegelijkertijd trekt nummer 2 de binnenpijp omhoog. Voordat de boring begint, wordt er water tussen de binnenpijp en de buitenpijp gegoten zodat er onder het leertje in de binnenpijp een vacuüm ontstaat. Dit zorgt ervoor dat het grondmonster de buitenpijp ingezogen wordt. In gebieden waar de grondwaterstand varieert van 0.5 tot 2.0 meter onder het maaiveld is het raadzaam te werken met twee zuigboren: één van 2.5 meter lengte en één van 4 à 5 meter lengte. Na de eerste 2.5 meter met de korte boor, kan er met de lange boor doorgeboord worden tot 4 meter diepte.

Gaat de boring tot maximaal 5 meter diep, dan is een boor met een diameter van 5 centimeter het meest geschikt. Diepere boringen (tot maximaal ongeveer 10 meter) zijn mogelijk met een boor met een diameter van 4 centimeter, met vier boren van met een lengte van resp. 2.5 m, 5 m, 7.5m en 10 meter.

In gebieden waar een zandpakket van enkele meters dikte op een klei/veenpakket ligt, dan kan De van der Staay zuigboor gebruikt worden om door het zandpakket te boren tot in het klei/veenpakket. Vervolgens moet de binnenpijp dan voorzichtig en zonder vacuüm uit de buitenpijp gehaald worden. De buitenpijp blijft als casing achter om de boring als gutsboring voort te zetten.

De Van der Staay zuigboor kent een aantal voordelen. De boor is goedkoop en kan zelf gemaakt worden. Hij is licht in gewicht, is geschikt voor moeilijk te bereiken plaatsen en het is mogelijk om snel en relatief diep te boren. Het is met deze boor ook mogelijk om filters plaatsen ten behoeve van het peilen van grondwaterstanden.

*Figuur B.2 Principe van de Van der Staay zuigboor waarmee onder de grondwaterspiegel ongeroerde monsters kunnen worden genomen. Het apparaat bestaat uit twee plastic buizen die zo precies in elkaar passen dat door het vacuüm dat ontstaat als de binnenbuis wordt teruggetrokken het boormonster in de buitenbuis wordt gezogen. [Figuur uit Montfrans et al., 1988].*

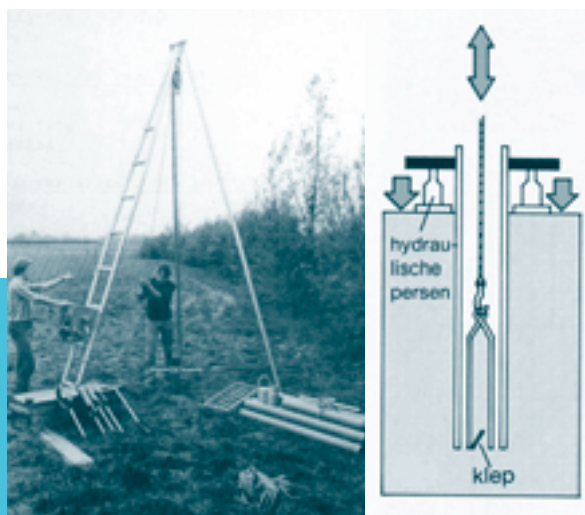


#### B.2.4 De handpulsboring

Als er geboord moet worden op een plek die voor boormaterieel slecht bereikbaar is, en er moet, afhankelijk van de opbouw van de ondergrond tot maximaal 15 meter diepte geboord en bemonsterd worden, dan is de handpulsset een mogelijk alternatief. Het voorboren kan met de Edelmanboor gedaan worden. Vanaf het grondwater-niveau wordt de boring dan verder als pulsborings uitgevoerd. De puls (een holle buis die in de grond wordt 'geheid' en zo de doorboorde grond verzamelt) is niet, zoals bij de meeste machinale boringen gebruikelijk is, bevestigd aan een kabel, maar wordt via boorstangen op diepte gebracht. Het is tevens, maar lang niet in alle gevallen, mogelijk om een continue monster te nemen.

Het bemonsteringsapparaat bij de handpulsboor werkt volgens het principe van de Van der Staay-zuigboor. De stangen worden de grond ingedrukt en gelijktijdig wordt met een touw de binnenbuis in het monsterapparaat omhoog getrokken (zie Figuur B.3).

*Figuur B.3 Een boorstelling met een handpulsboor opgesteld in het veld, de inzet toont het principe van een pulsborings [Figuur uit Montfrans et al., 1988].*



## B.3 Mechanische boringen met verbuisd boorgat

### B.3.1 Pulsboringen

Een oud maar nog steeds gangbaar boorsysteem is het pulsboorsysteem. Naast de handpulsboring kunnen machinaal versies met grotere diameter worden toegepast. Pulsboringen kunnen alleen onder de grondwaterspiegel uitgevoerd worden. De lagen boven het grondwaterniveau worden met behulp van een machinale avegaarboor (een soort spiraalboor zoals in Figuur B.1d) doorboord. Deze methode wordt verderop toegelicht bij roterende boormethoden.

Bij een puls boring zakt de boorbuis, die door een puls ondergraven wordt, naar beneden. De puls is een holle buis van één à anderhalve meter lengte, die aan de bovenzijde open is, aan de onderkant een snijrand heeft met vlak daarboven een horizontaal liggende klep (zie Figuur B.3 inzet). Door de puls steeds op te halen en weer te laten vallen (net als het blok van een heilmaschine), wordt de grond op de bodem van het boorgat losgemaakt en mengt het met het water uit het boorgat. Deze vloeibare massa dringt de puls binnen; de klep onder aan de puls zorgt er voor dat de brij er niet uitstroomt bij het ophalen.

Het ophijsen en laten vallen van de puls geschiedt door middel van een lier met een excentriek, dat er voor zorgt dat de puls telkens met een klap op het sediment valt. Daardoor schuift er telkens sediment de puls in. Het is belangrijk om er tijdens het boren rekening mee te houden dat de waterstand in de boorbuis op peil moet blijven. Door een te laag waterpeil kan zandig materiaal ten gevolge van waterdrukverschillen (wellen) de puls binnendringen. Grondmonsters die op dergelijke wijze verkregen zijn, worden geroerde monsters genoemd. Het materiaal is vermalen en verdund; er is dus niets over van de oorspronkelijke stratigrafie en structuur. Bij dit soort boringen geschiedt de classificatie van de grondsoorten op basis van het mengsel dat uit de puls komt. Het monster kan voor verder onderzoek door een monsterverdeelapparaat worden gesplitst in representatieve delen of in een kwadrateerbak in vier gelijke delen worden verdeeld.

Pulsboren is mogelijk in los sediment tot op een diepte van ongeveer 130 meter. Om tot op zo'n grote diepte te kunnen boren, is het nodig dat de boring begonnen wordt met een grote boordiameter. Gedurende het boorproces moet er dan enkele malen vertoerd worden. Vertoeren is het overgaan naar een kleinere boordiameter. Diep pulsen wordt vrijwel niet meer uitgevoerd omdat het erg duur is; de maximale diepte tegenwoordig is 45–50 meter. Vaak is er een betere alternatieve boormethode beschikbaar, gecombineerd met geofysische boorgatmetingen. Het steken van ongeroerde (niet verstoorde) monsters op grotere dieptes is tegenwoordig ook mogelijk in onverbuisde gaten.

Pulsboorinstallaties zitten doorgaans op een meerwielig aangedreven vrachtauto of op een rupsvoertuig. Onder normale weersomstandigheden kan praktisch elke locatie bereikt worden. Pulsboringen worden vaak toegepast om (ondiepe) grondwatermeetfilters of grondwaterwinfilters te plaatsen. Het is in de huidige tijd nog steeds een gangbaar boorsysteem en wordt tegenwoordig voornamelijk toegepast in zandige en/of grindige afzettingen. Het is ook mogelijk om puls boringen tijdelijk te onderbreken om in het boorgat ongeroerde monsters te steken, bijvoorbeeld met een guts.

### B.3.2 Ackermann boringen

Ackermann steekboringen zijn in principe continue gestoken pulsboringen. Om een zo compleet mogelijk beeld te krijgen van de ondergrond, worden grondmonsters in opeenvolgende steekbussen naar boven gebracht. Er is hier sprake van ongeroerde monsters. De monsters worden ter plaatse of in een laboratorium uit de bussen gedrukt, in gootjes gelegd, gefotografeerd en beschreven. De uitwendige diameter van een steekbuis bedraagt meestal 70 mm.

In plaats van het steken met stalen Ackermann bussen kan ook gekozen worden voor liners. Liners zijn PVC pijpen met een lengte van 0.5 tot 1 meter en een diameter van 10 centimeter. Met een steekapparaat worden deze liners de grond in gedreven c.q. geslagen. In het laboratorium worden de liners overlangs doorgesneden. Ook de monsters uit de liners zijn ongeroerd. Het voordeel van liners boven Ackermann bussen is makkelijke verwerking van de monsters. De PVC buizen kunnen overlangs doorgesneden worden zodat er direct een continue profiel beschikbaar is. Het gebruik van stalen steekbuizen is duurder, maar daar staat tegenover dat deze methode het monster minimaal verstoort. Het is niet mogelijk om monsters te steken in grindrijke afzettingen.

### B.3.3 Counter flush boringen

Counter flush boringen (roterend omgekeerd spoelen) worden uitgevoerd door middel van roterende dubbelwandige boorbuizen met daarop een boorkroon. Bij dit systeem wordt water tussen de binnen- en de buitenwand naar beneden gepompt. Door de overdruk van het water komt het door de boorkroon losgemaakte grondmonster via de binnenbuis in de spoelbak terecht (zie Figuur B.4). Deze boormethode levert betrouwbare grondmonsters op, mits er niet continu geboord wordt. Na iedere meter dient gestopt te worden, zodat er een monster in de spoelbak opgevangen kan worden. Wanneer het spoelwater weer schoon is en er dus geen materiaal meer meekomt, kan er weer één meter geboord worden. Dit boorsysteem is minder geschikt om filters te stellen i.v.m. de boordiameter en wordt daarom in de praktijk zelden daarvoor ingezet.



*Figuur B.4 Het aanbrengen van de boorbuizen tijdens een counter flush boring.*



### B.3.4 De holle avegaarboring

De holle avegaarboring is een methode om continue te kunnen steken. De avegaar wordt eerst de grond in gedreven. Daarna wordt de afsluiter onder in de holle avegaar verwijderd. Een steekapparaat voorzien van een steekbus of een liner met een lengte van één meter neemt een ongeroerd monster van het sediment direct onder de holle avegaar. Vervolgens wordt de afsluiter dicht gedaan en wordt er een meter verder geboord. Dit systeem kan gebruik maken van dezelfde installaties waarmee pulsboringen en zuigboor-luchtliftboringen worden uitgevoerd. In Figuur B.5 is een overzicht gegeven van verschillende holle avegaar boren.



Figuur B.5 Overzicht van holle avegaar boren met verschillende diameters.

### B.3.5 Knijperboringen

Bij deze boorteknik wordt een knijper aan een kabel het boorgat ingelaten (zie Figuur B.6). Met de knijper wordt vervolgens de buis 'leeg gegraven'. Deze techniek is goed bruikbaar bij zeer grof materiaal (zeer grof grind met stenen en keien) en is geschikt om obstakels zoals hout voor een boorbuis weg te halen.



Figuur B.6 Een knijperboring die uitgevoerd werd bij de grove grindafzettingen in Limburg.

## **B.4 Mechanische boringen met open boorgat**

### **B.4.1 Roterend boren**

Bij deze boormethode wordt een beitel die aan een roterende boorstang bevestigd is, de grond in geboord. Er wordt geen gebruik gemaakt van boorbuizen om de wand van het boorgat te bekleden (casing).

#### **B.4.1.1 Spoelboren**

Bij spoelboren wordt de grond door een snijschoen of boorbeitel losgemaakt en vergruisd. De boorbeitel of snijschoen zit bevestigd aan het eind van een serie holle buizen. Het water of de boorspoeling wordt door de boorbuizen naar beneden gepompt en voert het losgewerkte materiaal via de annulus (de ruimte tussen boorgatwand en boorbuis) mee omhoog. Het mengsel van spoeling en boorgruis dat aan het oppervlak het boorgat uitstroomt, wordt via een zeef en bezinkbak voor hergebruik geschikt gemaakt. Spoelboringen zijn efficiënt en economisch tot op grotere penetratiediepte (tot ca 120 m).

Het is mogelijk om met spoelboren een kern te nemen. Het losgeboorde materiaal (in dit geval veel minder dan 'normaal' spoelboren) wordt dan via de annulus met de boorvloeistof omhoog gevoerd. De kern, in het midden van de boorbuis, blijft staan en wordt via zogenaamde 'corebarrels' in stukken van maximaal 1,5 m lengte naar de oppervlakte gehaald. Dit systeem van kernen is geschikt voor gesteenten en geconsolideerde of sterk cohesieve gronden (bijvoorbeeld op grotere dieptes of dicht bij het oppervlak in Zuid-Limburg en bij Winterswijk). Er zijn verschillende methoden bij het spoelboren ontwikkeld die hieronder kort worden beschreven.

#### **Roterend direct spoelen (straight flush)**

Bij straight flush boringen wordt het spoelwater door de boorstangen naar beneden gepompt. Het grondmonster gaat, nadat het door de boorkroon is losgewoeld, met de boorvloeistof naar het oppervlak in de ruimte tussen de boorstang en de open boorgatwand. Deze grondmonsters zijn onbetrouwbaar. Tijdens het transport naar boven kan er materiaal uit de wand van het boorgat meegenomen worden. De exacte diepte en samenstelling van een monster zijn bij deze boormethode dan ook slecht vast te stellen. In veel gevallen is er sprake van 'vervuiling' van het opgeboorde monster door 'hoger' materiaal uit de wand.

#### **Roterend omgekeerd spoelen (counter flush)**

Deze boormethode is al behandeld bij de verbuisde boorgaten. De monsters die hier beschikbaar komen, zijn betrouwbaarder dan die afkomstig van straight flush boringen, omdat het materiaal door de boorstangen naar boven vervoerd wordt en er dus minder kans op verontreiniging is.

#### **Roterend omgekeerd zuigboren**

Bij dit boorsysteem wordt de boorspoeling en het losgeboorde grondmonster met behulp van een zuigpomp via de boorbuis met boorbeitel opgepompt. De toevoer van het spoelwater geschiedt door de ruimte tussen boorstang en boorgatwand.

#### **Zuigboor-luchtlift boorsysteem**

Dit systeem is een eigenlijk verbeterde versie van het omgekeerd zuigboren. Door middel van een zuigpomp gecombineerd met luchtdruk, wordt de boorspoeling en het losgeboorde materiaal door de boorbuis met boorbeitel opgepompt. De toevoer van het spoelwater geschiedt door de ruimte tussen boorstang en boorgatwand. Figuur B.7 toont de uitvoering van een luchtliftboring.





*Figuur B.7 De uitvoering van een luchtliftboring in het terrein. Dit soort boringen vergt behoorlijk wat werkruimte en niet ieder terrein zal toegankelijk zijn voor dit soort zware voertuigen.*

#### **B.4.1.2 Avegaarboringen**

Avegaarboringen worden met dezelfde mechanische boorstelling uitgevoerd als puls-boringen. Een avegaar is een spiraalboor die gebruikt wordt om het traject tot aan het grondwater te boren. Deze boren hebben een diameter die kan variëren van circa 10 centimeter tot meer dan 100 centimeter. Er zijn verschillende typen avegaren in gebruik afhankelijk van de grondsoort waar doorheen geboord gaat worden. Door middel van draaien en drukken wordt de boor in de grond gebracht. De losgewerkte grond wordt via de spoed van de avegaar naar boven gevoerd of omhoog getrokken (zie Figuur B.8).

Dit systeem is onder de grondwaterspiegel alleen geschikt voor sterk cohesieve afzettingen zoals klei, potklei of keileem. Bij niet cohesieve gronden (zand/grind) kan de boring beneden de grondwaterstand voort gezet worden met het pulssysteem of met de Ackermann steekmethode. Avegaarboringen kunnen ook gebruikt worden bij speciaal veldwerk om bijvoorbeeld de bovenkant van een grindpakket te bepalen. Bij bodemonderzoek op vuilstorten, wordt de gestorte laag met de avegaar doorboord, waarna vervolgens overgeschakeld wordt op een ander boorsysteem. Als de boor door grind gaat, dan moet er geboord worden met de puls. Wanneer er teveel grote stenen in de boorbuis komen, dan kan de avegaar gebruikt worden om de stenen boven te krijgen. Zitten er grote stenen voor de opening van de boorbuis, dan kunnen die met de avegaar weggeduwd worden.

Bij verschillende werkwijzen tijdens een boring, is het belangrijk om duidelijk afspraken te maken welke apparatuur ingezet wordt. Voor het uitvoeren van korrelgrootte-onderzoek bij bijvoorbeeld boringen waar tot het grondwater wordt gewerkt met een avegaarboring en daaronder met een puls-boring is het belangrijk om te weten welk deel van de boring met de avegaarboring is uitgevoerd en welk type avegaar is toegepast.

*Figuur B.8 Het monster bij de holle avegaar zit in de spoed van de spiraal. De boren zijn in verschillende diameters te krijgen.*



## **B.4.2 Niet roterend boren**

### **B.4.2.1 De ramguts- of trilboring**

In feite is een ramguts- of trilboring niets anders dan een mechanische uitvoering van de handgutsboring. Bij een ondergrond die voornamelijk uit zand bestaat wordt dit type boring vaak gebruikt, omdat het een handguts dan moeilijk op diepte te krijgen is. Het nadeel van deze methode is dat het monster doorschuift aan de binnenzijde van de guts en daardoor verstoord kan worden. Personeel dat niet voldoende ervaring heeft met deze boortechniek en de onvoldoende kennis heeft over opbouw van de ondergrond, kan dit verschijnsel niet onderkennen. Het is in bepaalde zandpakketten mogelijk dat de guts wel de grond ingetrild wordt, maar dat het zand niet de guts in geschoven wordt. De guts met inhoud wordt op deze manier als een heipaal de grond ingeslagen. Ook kan het gebeuren dat slappe kleilagen uit de guts geperst worden.

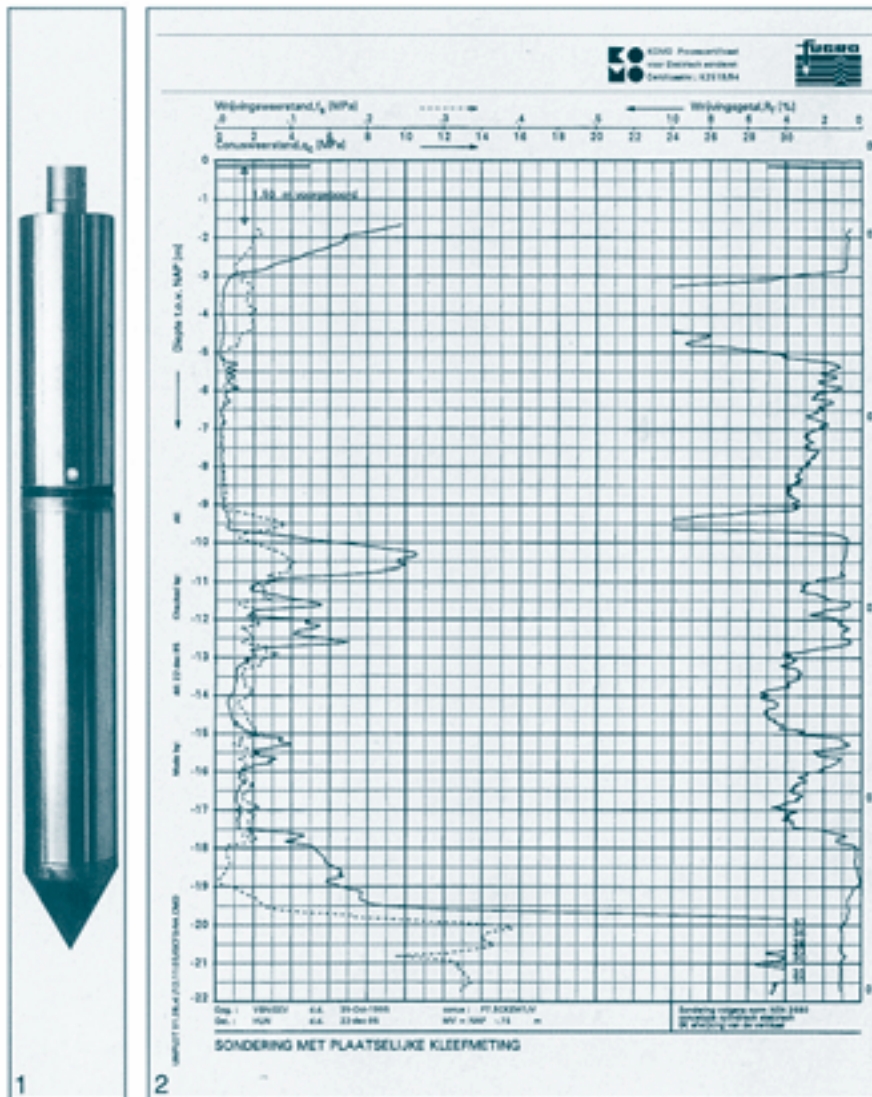
### **B.4.2.2 De Begemann boring**

Een Begemann boring is een continue gestoken boring. Vergeleken met een Ackermann boring geeft deze methode een ongestoord en ononderbroken beeld van de opbouw van de ondergrond. Deze techniek werkt alleen goed in de klei/veengebieden van Noord- en West- Nederland. De boring is een ideale methode om de fysische parameters van de ondergrond te onderzoeken. De Begemann boring is een vinding van GeoDelft.

### B.5 Sonderingen

Sonderen is techniek waarbij een sonde (de allereerste sonde was gewoon een stalen pen) in de bodem geduwd wordt om zo de eigenschappen van het medium vast te stellen. In Nederland is deze methode uitgereid tot een gestandaardiseerde meettechniek waarbij de sonde (sondeerconus) met een constante snelheid van ongeveer 20 mm/seconde de grond in wordt gedrukt. De weerstand tijdens het indrukken wordt met een drukopnemer geregistreerd. De resultaten van een sondering worden gepresenteerd in een sondeergrafiek waarbij voor elke 2 mm (20 cm voor een mechanische sondering) de geregistreerde parameter zijn uitgezet.

Naast de conusweerstand worden ook vaak de plaatselijke mantelwrijving en/of de waterspanning gemeten. Door jarenlange ervaring is het door beide gegevens te combineren (conusweerstand en wrijvingsweerstand) mogelijk om een goed beeld te krijgen van de lithologische opbouw van de ondergrond. Sommige specialisten kunnen zelfs uitspraken doen over de grofheid van het aangetroffen materiaal. In Figuur B.9 is een voorbeeld gegeven van een sondeerdiagram waarbij de conusweerstand en de wrijving is gemeten.



Figuur B.9 In een sondeerdiagram zijn de conusweerstand en de wrijving uitgezet tegen de diepte. De grote van de weerstand en de wrijving zijn indicaties voor de grondsoort waar doorheen geboord is. Op het diagram staat ook het wrijvingsgetal aangegeven dat uit deze twee parameters berekend wordt.

Er zijn in principe twee sondeertechnieken:

- Bij *elektrisch sonderen* wordt de weerstand die de punt van de sondeerconus ondervindt via rekstrookjes in de conus gemeten en elektrisch doorgegeven aan een registratieapparaat.
- Bij *mechanisch sonderen* wordt de weerstand die de conus tijdens het indrukken ondervindt via een stang in de sondeerbuis 'mechanisch' doorgegeven aan een meetunit. Deze meetunit kan een mechanische of een elektrische drukopnemer zijn.

De reactiekracht die nodig is om de sonde de bodem in te duwen, wordt geleverd door het gewicht van het sondeerapparaat of door verankering. Standaard worden sonderingen uitgevoerd met een gewicht tussen de 120 en 200 kilo Newton vanuit een zes-wiel aangedreven vrachtwagen. De wagens kunnen tijdens het sonderen door middel van stempels horizontaal worden gesteld. Om de bereikbaarheid van moeilijke locaties te vergroten zijn er een aantal aanpassingen aan voertuigen of apparatuur mogelijk, zoals:

- Een rupsvoertuig voor metingen onder slechte terreinomstandigheden of bij steilere hellingen;
- Normale sondeerwagens waarbij tussen de voor en achteras een rupsonderstel is aangebracht (een zogenaamde track-truck) voor metingen op slechte begaanbare terreinen (zie Figuur B.10);
- Sondeerwagens waar alle overbodige ballast vanaf gehaald is en de wielen zijn vervangen door tractorbanden voor metingen onder slechte terreinomstandigheden, op slibvelden of in waddegebieden;
- Los sondeerapparaat voor locaties die niet toegankelijk zijn voor groot materieel. Een dergelijk apparaat kan een maximale druk van 100 of 200 kN leveren waarbij de benodigde reactiekracht wordt geleverd door grondankers;
- Voor locaties met een geringe werkhoogte en/of zeer slechte toegankelijkheid bestaat er een 'kruipapparaat'. Dit sondeerapparaat kan eenvoudig worden gemontereerd in hanteerbare onderdelen. De benodigde reactiekracht om de sondeerconus in de grond te krijgen wordt geleverd door grondankers bevestiging aan de vloer, of door afstempeling op bovenliggende constructies;
- Voor sonderen op het water kan een van bovenstaande sondeerapparaten gewoon met een beun op een ponton geplaatst worden (Figuur B.11).



Figuur B.10 Een van de aanpassingen die mogelijk zijn om ook op slecht begaanbare terreinen te kunnen sonderen: een sondeerwagen met extra rupsonderstel.

Om tot op meer dan enkele tientallen meters diep te kunnen sonderen, kan gebruik gemaakt worden van spoelsonderingen. Hierbij wordt het sondeergat gevuld met een bentonietspoeling, een mengsel van water en bentoniet (bentoniet is een kleisoort met grote zweleigenschappen). Deze spoeling minimaliseert de wrijving tussen het sondeergat en de sondeerstang, waardoor een groter deel van de drukcapaciteit van



de sondeerwagen kan worden gebruikt voor het overwinnen van de drukweerstand van de sondeerconus. Op deze manier kunnen sonderingen worden uitgevoerd tot in (of door) vast tot zeer vast gepakte zandlagen of stijve kleilagen (bijvoorbeeld potklei, Eem klei, Boomse klei).

Bij het passeren van grindlagen kan de (dure) elektrische conus beschadigen. Dit probleem kan worden ondervangen door het toepassen van mechanische sonderingen. Wordt de conusweerstand te hoog, dan is de slagsondering nog een alternatief. Hierbij wordt de conus de ondergrond ingeheid door een valgewicht van ca. 50 kg. De heikalender kan door middel van een 'heiformule' worden vertaald naar conusweerstand. Naast bovenstaande mogelijkheden bestaan er ook nog speciale conussen voor het meten van fysische bodem parameters (elektrische geleidbaarheid, zuurgraad, redoxpotentiaal, temperatuur) en milieuparameters (koolwaterstoffen). Verder kunnen er met deze sondeertechnieken kleine filters op (grotere) diepte worden geplaatst om grondwatermonsters of bodempluchmonsters te nemen.

## B.6 Boren en sonderen op water

### B.6.1 Inleiding

De technieken om op binnenwater te boren en de waterbodem te bemonsteren komen op een aantal punten overeen met de technieken die gebruikt worden op het land. Wel zijn een aantal aanvullende technieken beschikbaar en zijn er een aantal extra aspecten waar rekening mee gehouden moet worden. Om op water te kunnen boren is een boorschip of ponton noodzakelijk (zie Figuur B.11). Verder dient er ook voor het boren op water een KLIC (Kabels en Leidingen Informatie Centrum) melding uitgevoerd te worden. Met de beheerder van het water moeten van afspraken gemaakt worden over de uitvoering van het onderzoek. De werkzaamheden kunnen immers een obstructie vormen voor het reguliere gebruik van het water (meestal scheepvaart).

De plaatsbepaling en met name het bepalen van de hoogteligging van de waterbodem (in dit geval het 'maaienveld' van de boring) vraagt extra aandacht. Dit is specialistisch werk dat door in deze materie ervaren personeel uitgevoerd dient te worden. Een goede plaatsbepaling (in de x-, y- en z-richting) is van cruciaal belang voor de bruikbaarheid van de boring. Het boren op water vraagt ook extra logistieke maatregelen. Voor het afhalen van monsters bijvoorbeeld en het werk van de toezichthouder is het noodzakelijk om over vervoer tussen haven en boorlocatie te kunnen beschikken. In Nederland zijn meerdere firma's die schepen en pontons hebben waar vanaf het mogelijk is te boren, te sonderen of ander onderzoek te verrichten.



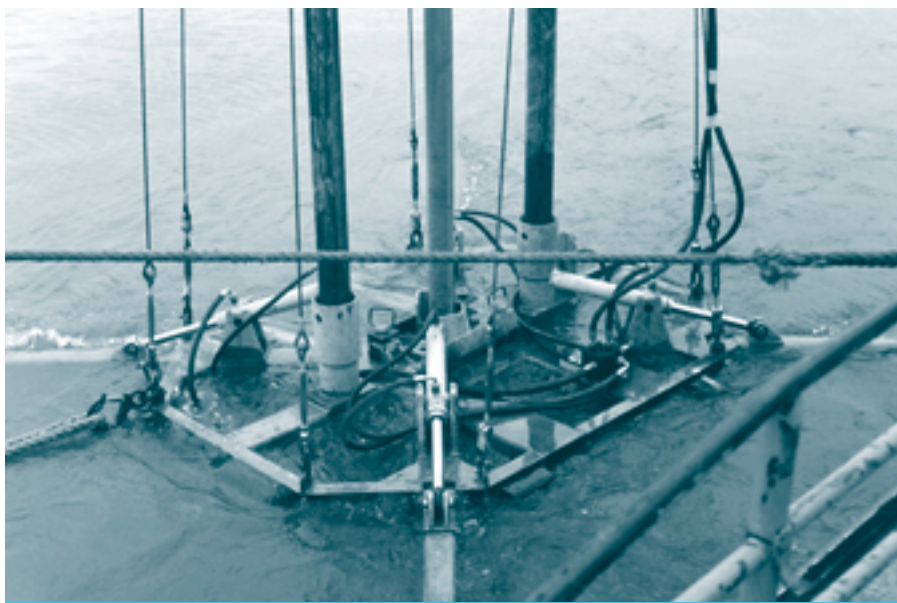
*Figuur B.11 Een sondering op water die vanaf een ponton wordt uitgevoerd.*

### B.6.2 Speciale boortechnieken voor waterbodems

In principe kunnen alle boormethodes uit deze bijlage die gebruik maken van een casing (dus een verbuisd boorgat) ook op het water toegepast worden. Bovendien zijn er voor het uitvoeren van boringen op water een aantal aanvullende boorsystemen beschikbaar. Er zijn enkele 'water'specifieke aspecten waar rekening mee gehouden moet worden zoals stroming, deining en bodemdiepte.

#### De Vibracorer (ongeroerde monsters)

Met dit boorsysteem wordt een stalen buis met daarin een PVC liner de bodem in getrild. Aan de onderzijde van de stalen buis bevindt zich een core-catcher. Dit is een voorziening die er voor zorgt dat het monster niet uit de buis kan zakken. De Vibracorer wordt met een hijskraan op de bodem geplaatst. Vervolgens wordt de boorbuis de bodem in gevibreerd, een actie die slechts een tiental seconden duurt. Wanneer de gehele boorbuis de bodem in is getrild, wordt de apparatuur weer aan boord gehesen. De PVC liner wordt uit de stalen boorbuis getrokken, in stukken van 1 meter gezaagd en afgedopt. Een vibracorer kan een bereik hebben van 1 meter tot maximaal 8 meter diepte beneden de waterbodem. Afhankelijk van het doel waarvoor de monsters genomen zijn kan men kiezen om de monsters aan boord te verwerken (beschrijven, bemonsteren) of ze verzendklaar te maken voor laboratoriumonderzoek. De Vibracorer heeft de beste resultaten in fijne en grove (al dan niet kleihoudende) zanden en grind. Problemen zijn te verwachten in dikke zware kleipakketten. Vibracorer, beschikbaar in diverse uitvoeringen, zijn goed inzetbaar op de Nederlandse binnenwateren en meren. De Rijks Geologische Dienst gebruikte voor ondiepe boringen de Senkovitsch, en ontwikkelde later, toen de vraag naar diepere informatie toenam, de Trilflip (zie Figuur B.12).



Figuur B.12 De tewaterlating van een trilflip boorsysteem.

**De Geodoff (geroerde monsters)**

Deze boorinstallatie kan zowel ondiepe vibracore-monsters als diepere geroerde monsters nemen. Het is mogelijk om de eerste meters ongeroerd te steken en vervolgens over te schakelen op het counter-flush luchtlift systeem. Op deze manier kunnen boringen uitgevoerd worden tot maximaal 10 meter onder de waterbodem. De maximale waterdiepte bedraagt ca. 150 m. De Geodoff is inzetbaar op de grote Nederlandse rivieren op ieder schip met een hijskraan en voldoende werkruimte.

**De Roflush (geroerde monsters)**

De Roflush boorinstallatie is met name ontworpen om informatie te verkrijgen over de diepere ondergrond van de Noordzee. Door middel van het counterflush-luchtlift systeem worden geroerde monsters verkregen. Met dit systeem kan geboord worden tot een diepte van ongeveer 20 tot 30 meter. Momenteel wordt dit systeem verder ontwikkeld om te kunnen boren tot dieptes van 40 meter onder de waterbodem. Tot nu toe is het Roflush alleen nog gebruikt op zee maar in principe is dit systeem ook toepasbaar op grote rivieren en binnenwateren.

**B.7 Erkende boorbedrijven**

De risico's bij het op onjuiste wijze omgaan met het grondwater of onzorgvuldig uitvoeren van grondboringen zijn groot. Sinds 1996 is de vestigingswet op de grondboor- en bronbemalingbranche van toepassing zodat er wettelijk regels zijn die opdrachtgevers horen te beschermen tegen ondeskundige grondboor- en bronbemalingbedrijven. Op initiatief van de Vereniging van Boorondernemers en Buizenleggers (Bolegbo) is de Stichting Erkenning voor het Grondboor- en Bronbemalingbedrijf (EGB) opgericht. De EGB heeft tot doel de kwaliteit van het ondernemerschap en het product in de grondboor- en bronbemalingbranche te bevorderen.

Een erkend bedrijf is verplicht zich te houden aan door de EGB opgestelde gedragscode. Volgens deze gedragscode is het erkende bedrijf bijvoorbeeld verplicht in de prijsaanbieding en het contract duidelijk aan te geven op welke wijze alle noodzakelijk geachte werkzaamheden worden geregeld. Het erkende bedrijf is ook verplicht de opdrachtgever op alle omstandigheden te wijzen die afwijken van wat in het contract is omschreven. Het erkende bedrijf dient zich er voorts van te vergewissen dat de benodigde vergunningen zijn verkregen en de noodzakelijke meldingen zijn uitgevoerd. Op deze wijze wordt van tevoren ieders verantwoordelijkheid goed geregeld.

De EGB erkende boorbedrijven werken volgens een aantal regels die zijn onder te verdelen in veiligheidsregels en milieukundige regels. De volgende regels hebben betrekking op de veiligheid:

- Een erkend grondboor- en bronbemalingbedrijf werkt uitsluitend met jaarlijks veiligheidsgekeurde boorinstallaties.
- Een erkend grondboor- en bronbemalingbedrijf werkt op basis van een Arbo-beleidsplan. De EGB heeft voorwaarden opgesteld waaraan dit Arbo-beleidsplan moet voldoen.

Dit geeft de opdrachtgever de zekerheid dat het werk op een correcte wijze wordt uitgevoerd, conform de wettelijke regels. Volgens de nieuwe wettelijke regels ten aanzien van de arbeidsomstandigheden krijgt de opdrachtgever de verantwoordelijkheid toebedeeld op de bouwplaats. Aangezien een erkend bedrijf volgens het Arbo-plan te werk gaat, beperkt dit de risico's voor de opdrachtgever aanzienlijk.



Ten aanzien van het milieu zijn in de erkenningsregeling onder andere de volgende eisen opgenomen:

- Opslag, afvoer en verwerking van chemicaliën conform de wettelijke regels.
- Toereikende maatregelen om vervuiling van de bouwplaats tegen te gaan; het bedrijf is verplicht zijn afval op te ruimen.
- Het herstellen van doorboorde slecht-doorlatende lagen.
- Lozing van boorspoeling en grondwater alleen met instemming van beherende instanties.
- De verplichting om bodemverontreiniging geconstateerd tijdens het werk te melden aan de opdrachtgever.
- Voldoende maatregelen ten aanzien van geluidsoverlast in stiltegebieden en in de bewoonde omgeving.

De bedrijven die door de EGB zijn toegelaten, worden opgenomen in het Register van Erkende Grondboor- en bronbemalingbedrijven. Het register is op te vragen bij het secretariaat van de EGB: Middelwijkstraat 23-25, Postbus 137, 3760 AC Soest.  
Tel: 035 6010254, E-mail: [info@bolegbo.nl](mailto:info@bolegbo.nl).

## Inhoud

<b>C</b>	<b>Geofysische methoden</b>	103
<b>C.1</b>	<b>Inleiding</b>	103
<b>C.2</b>	<b>Georadar</b>	104
C.2.1	Principe	104
C.2.2	Toepassing	105
<b>C.3</b>	<b>Hoge Resolutie Seismiek</b>	106
C.3.1	Principe	106
C.3.2	Toepassing	106
<b>C.4</b>	<b>De Geo-elektrische methode</b>	107
C.4.1	Principe	107
C.4.2	Beperkingen	107
C.4.3	Continue verticale elektrische sonderingen	108
C.4.4	2-D Inversie van de continue geo-elektrische data	108
<b>C.5</b>	<b>Elektromagnetische methode (EM)</b>	109
C.5.1	Inleiding	109
C.5.2	Meettechnieken	109
C.5.3	Elektromagnetisch sonderen	110
<b>C.6</b>	<b>Boorgatmetingen</b>	111
C.6.1	Inleiding	111
C.6.2	Toepassing	112
C.6.3	Standaard boorgatmetingen	112
C.6.4	Aanvullende boorgat metingen	113
<b>C.7</b>	<b>Elektrische en seismische tomografie (TOMOSO)</b>	114



## C Geofysische methoden

### C.1 Inleiding

In deze bijlage wordt een overzicht gegeven van de meest gangbare geofysische technieken die gebruikt worden voor bodemonderzoek. Dit overzicht is niet compleet en ook kunnen intussen nieuwe methoden zijn ontwikkeld. Geofysische methoden zijn indirecte meettechnieken waarbij elektromagnetische golven of kunstmatige seismische trillingen de bodem worden ingestuurd. De teruggekaatste golven geven informatie over de verschillende lagen en de structuren in de ondergrond. Bij interpretatie van geofysische gegevens kan een tweedimensionaal en tegenwoordig vaak zelfs een driedimensionaal beeld van de ondergrond worden verkregen. Geofysische methoden hebben als eigenschap dat ze niet-destructief zijn, de bodem wordt niet fysiek beroerd of verstoord wat bij boringen of sonderingen wel het geval is. De keuze van de juiste geofysische methode vloeit voort uit de vraagstelling van het onderzoek en de locale bodemgesteldheid. Geofysische metingen bieden tegen relatief geringe kosten ten opzichte van boringen een grote (continue) meetdichtheid. Toch zijn voor geofysische metingen ook altijd boringen of sonderingen nodig ter ijking. Geofysische methodes zijn uitermate geschikt om een continue beeld van de bodem te verkrijgen tussen bestaande boringen bijvoorbeeld om afwijkende gebieden of zones binnen een onderzoeksgebied te ontdekken of uit te karteren; hetgeen op basis van alleen boringen of sonderingen maar moeizaam te realiseren is.

Tabel C.1 geeft een de relevante kentallen van de geofysische methoden (exclusief de boorgatmetingen) die in deze bijlage beschreven staan. De doorlooptijden en richtprijzen die in de tabel staan, zijn gemiddelde waarden, gebaseerd op normale toepassing van de vermelde onderzoekstechnieken, zonder aan- en afvoerkosten of interpretatie.

Tabel C.1. Samenvatting van geofysische methoden.

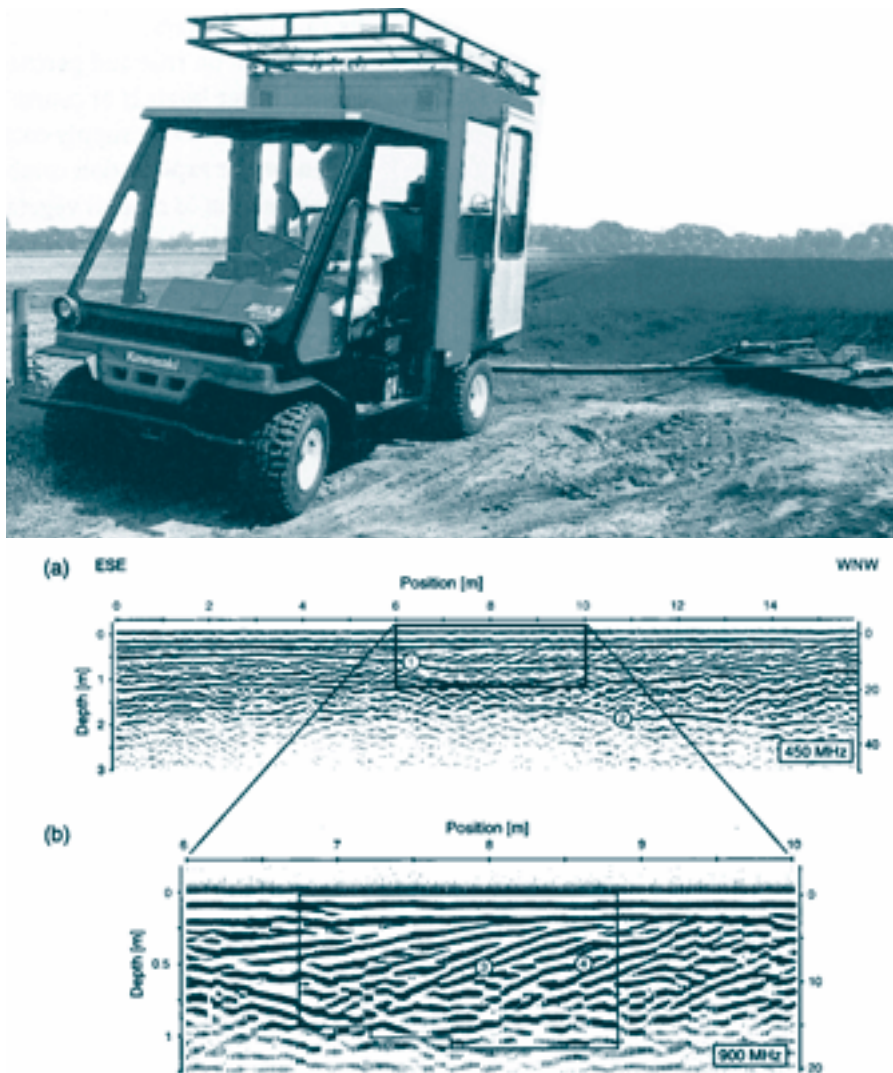
Geofysische onderzoeksmethode	Doorlooptijd (km per dag)	Richtprijs [EUR/km]	Detecteerbaarheid/ Contrast	Resolutie en nauwkeurigheid naar de diepte	Resolutie 0-5 m. Resolutie 5-20 m. Resolutie 20-50 m.	Opmerkingen	Beperkingen	Toepasbaarheid in Nederland
Georadar	2	225–2300	klein contrast kleine schaal	neemt weinig af	++   -   -	toegepast in wegebouw, voor kabels en leidingen onduidelijk beeld door te veel detail	kan maar tot beperkte diepte, alleen toepasbaar boven grondwater-spiegel	overal m.n. gestuwde afzettingen duinen, Z-Limburg
Hoge-res. seismiek (land)	1	7000–10.000	groot contrast grote schaal	neemt weinig af	-   -   ++	groot dieptebereik; veel detail	informatie vanaf 20 m. wordt relatief duur	overal
Hoge-res. seismiek (water)	10	450	groot contrast grote schaal	neemt weinig af	++   ++   ++	werkt vanaf waterbodem, maximale indringen gelijk aan waterdiepte	mogelijke hinder door scheepvaart	waterwegen, meren, Noordzee, IJsselmeer
Geo-elektriek (land)	0,5	1800–2600	groot contrast grote schaal	neemt sterk af	++   +   -	gemeten geleidbaarheid is afhankelijk van dikte en eigenschappen van de laag!	vaak niet eenduidig te interpreteren; werkt niet in zout grondwater	overal
Elektro-magnetisch onderzoek (EM31)	5	150	groot contrast grote schaal	Neemt sterk af	++   +   -	zoeken naar afwijkingen tussen boorpunten	vaak niet eenduidig te interpreteren	overal

- slecht, + matig, ++ goed

## C.2 Georadar

### C.2.1 Principe

De georadar of grondradar (ook wel GPR, ground penetrating radar genoemd) maakt gebruik van elektromagnetische golven om de ondiepe ondergrond snel en met een hoge resolutie in kaart te brengen. Een zendantenne zendt vanaf het maaiveld een elektromagnetische golfvorm uit die zich voortplant in de ondergrond (Figuur C.1a). Is er in de ondergrond een inhomogeniteit (bijvoorbeeld de overgang van droog naar nat), dan reflecteert een deel van de elektromagnetische energie op die overgang richting maaiveld, waar de ontvangantenne de golfvorm registreert. Het niet-geïnterpreteerde deel van de golf plant zich verder voort in de ondergrond. Figuur C.1b toont een voorbeeld van een profiel met georadar opgenomen. De mate van penetratie in de bodem is afhankelijk van de bodemweerstand en de gebruikte golflengte. De golflengte kan gevarieerd worden. Een hoge bodemweerstand (meer dan 110  $\Omega\text{m}$ ), gekoppeld aan een lage grondwaterstand geeft een hoge indringend vermogen variërend van 10 tot 40  $\Omega\text{m}$ . Klei heeft een lage bodemweerstand en heeft daardoor een geringe indringing. Georadar is meestal niet te gebruiken wanneer een kleidek van meer dan 1 meter dikte aan de oppervlakte voorkomt.



Figuur C.1 (a) Opname van een georadar profiel met een meetwagen met zender en ontvanger die wordt voortgesleept. (b) Voorbeeld van een met de georadar opgenomen profiel van zandduinen bij Katwijk aan zee [Figuur uit Van Dam, 2001]. Met 450 Mhz signaal kan in dit geval de bovenste 2 meter worden onderzocht. Met het hogere 900 Mhz signaal (zie uitsnede) ontstaat een gedetailleerder beeld maar kan minder diep worden gekeken. De bovenste bodemlagen lopen horizontaal. Daaronder zijn scheve door de wind gevormde zandlagen te zien (nummers 3 en 4).

### C.2.2 Toepassing

Georadar wordt vooral gebruikt voor technisch bodemonderzoek tot een diepte van enkele meters onder het oppervlak. De diepte waarop nog onderzoek gedaan kan worden, is slechts kort geleden uitgebreid tot enkele tientallen meters (in gunstig terrein) door de komst van digitale instrumentatie en laagfrequente antennes. Georadar met lage frequenties (<200 MHz) kan de ondergrond in beeld brengen tot ca 10 meter onder het maaiveld. Diepere bodemlagen die buiten het bereik van georadar liggen kunnen worden onderzocht met reguliere seismische technieken die werken met akoestische signalen die beter doordringen dan de radiogolven van de georadar.

Georadar kan goed toegepast worden voor grondwateronderzoek in sedimentaire zandgebieden met een hoge elektrische weerstand. In Nederland beperkt de toepassing zich tot de hoger gelegen gebieden in het oosten met zandafzettingen in stuwwallen (de Veluwe) en terrassen waar het grondwater voorkomt op dieptes van 10 meter tot meer dan 40 meter. Georadar is daar met succes toegepast bij onderzoek naar sprongen in de grondwaterstand, de structuur van ijsgestuwde ruggen, schijnspiegels en onderzoek naar de continuïteit van ondoordringbare lagen. In de laaggelegen gebieden in het westen van het land is het gebruik van de Georadar meestal niet mogelijk door kleiafzettingen en brak en zout grondwater op geringe diepten, die een lage elektrische weerstand hebben en de radargolven verzwakken. De zandduinen aan de kust vormen daarop een uitzondering; daar kan de georadar wel gebruikt worden. In Zuid-Limburg zijn pogingen ondernomen om de grindvoorkomens en de dikte van de pakketten in het Maasdal met Georadar te karteren. De afdekkende leemlaag vormt echter een te grote demping om voldoende indringing te krijgen.

### C.3 Hoge Resolutie Seismiek

#### C.3.1 Principe

Hoge Resolutie Seismiek (HRS) is een geofysische techniek, waarbij met behulp van kunstmatig opgewekte seismische trillingen inzicht verkregen wordt in de structuur van de ondergrond. Deze methode geeft 'continue' informatie over de ondergrond, maar kan, in tegenstelling tot de grondradar, gebruikt worden tot op grote dieptes, afhankelijk van het gebruikte signaal tot enkele kilometers diepte.

Voor het opwekken van een seismisch signaal is een bron nodig. Bij TNO-NITG wordt veelal gebruik gemaakt van een geringe, in een boorgat geplaatste, lading dynamiet. Het is wenselijk om de lading in ieder geval onder het grondwaterniveau te plaatsen. De doelstelling van het onderzoek is bepalend voor de diepte van de gaten en de grootte van de springlading. Het teruggekeerde signaal wordt geregistreerd door ontvangers aan het aardoppervlak. Het resultaat van een seismische meting is een seismogram waarin verschillende reflectoren te zien zijn die veroorzaakt zijn door laagovergangen in de ondergrond. Figuur 3.4 in de hoofdtekst toont een voorbeeld van het gebruik van seismische opnames bij rivierbodemonderzoek.

#### C.3.2 Toepassing

Hoge resolutie seismiek kan worden gebruikt om de diepere ondergrond in kaart te brengen en is vooral onder de volgende omstandigheden een nuttige methode:

- als er niet geboord kan worden;
- als de relevante diepte zo groot is dat boren heel duur is;
- als het belangrijk om laterale overgangen in de ondergrond nauwkeurig te detecteren; er zijn veel boringen nodig om dat efficiënt te bepalen (het aantal boringen kan zo gereduceerd worden);
- als de ondergrond complex van structuur is, zodat boringen niet voldoende betrouwbare informatie opleveren;
- indien gedetailleerde, continue, informatie van de bodemopbouw gewenst is.

Een seismische sectie levert bruikbare informatie op tot een diepte van enkele tientallen meters tot enkele honderden meters, afhankelijk van de veldparameters (afstanden tussen signaalopnames, gebruikte bronsignaal) en de verschillende eigenschappen van de ondergrond (grondwaterspiegel, akoestische sterk dempende lagen, etc.). Om HRS-profielen lithologische te kunnen interpreteren, zijn aanvullende gegevens nodig (bijvoorbeeld boringen). Om een meer gedetailleerd diepteprofiel te krijgen, wordt vaak een extra, veel kleinere, seismische acquisitie gedaan, een zogenaamd Vertical Seismic Profile (VSP), dat in een boorgat wordt uitgevoerd.



HRS levert in de meeste gevallen gedetailleerde en continue informatie over de ondergrond. Per meter profiel zijn de kosten dan zeer beperkt. Op land komen de kosten voor acquisitie en interpretatie van een seismisch profiel van ca. 3 km komen ongeveer overeen met het geld dat nodig is voor één boring van ca. 400 m. Metingen op het water zijn doorgaans goedkoper dan op land.



*Figuur C.2 De voorbereidingen voor een geo-elektrisch onderzoek: het uitleggen van de kabels voor de elektrodes.*

## C.4 De Geo-elektrische methode

### C.4.1 Principe

Grondsoorten hebben afhankelijk van hun samenstelling, kleigehalte, porositeit een specifieke elektrische geleidbaarheid. Met behulp van de geo-elektrische methode kunnen verschillen in de specifieke weerstand van de bodemlagen worden gemeten om op basis daarvan laagovergangen in kaart te kunnen brengen. Bij de metingen wordt met behulp van een accu en twee stroomelektrodes een stroom door de grond gestuurd en wordt het potentiaalverschil over twee potentiaalelektrodes gemeten (zie Figuur C.2). Uit dit potentiaalverschil wordt de specifieke weerstand van de bodem berekend. Bij de geo-elektrische methode zijn net als bij seismiek altijd boorgegevens nodig ter correlatie. Door geo-elektrische metingen met boorgegevens te vergelijken kan op basis van verschillen in elektrische geleidbaarheid een laagscheiding tussen de boringen in nauwkeurig worden gelokaliseerd.

### C.4.2 Beperkingen

De geo-elektrische methode kent de volgende drie beperkingen:

1. *Contrasten in soortelijke elektrische weerstand.* De geo-elektrische methode is alleen zinvol indien de te onderscheiden lagen duidelijke contrasten vertonen in soortelijke weerstand. Een goed contrast is bijvoorbeeld aanwezig tussen met zoetwater verzadigde leem (fijn zand/silt met klei) en grind. Het contrast tussen met zoetwater verzadigd zand en grind is minder groot, zodat de grens tussen die afzettingen minder nauwkeurig bepaald kan worden. Het ionengehalte van het grondwater (de elektrische geleidbaarheid en de diepte van de grondwaterspiegel hebben invloed op de elektrische weerstand. Deze invloeden kunnen soms zo overheersend zijn dat ze lithologische contrasten in de ondergrond maskeren.
2. *Equivalentie.* De belangrijkste beperking van de geo-elektrische methode betreft equivalentie; het gegeven dat er verschillende ondergrondmodellen mogelijk zijn met één dataset. Zonder additionele informatie is het niet mogelijk om een éénduidig model van de ondergrond te leveren. De noodzakelijke extra informatie bestaat uit een goede algemene geologische kennis van de lokale ondergrond en, met name, boringen (met boorbeschrijvingen) zo dicht mogelijk bij de meetlocatie. Een tweede beperking van de geo-elektrische methode, die ook onder equivalentie valt, is het probleem dat dunne lagen (1 meter dik op een diepte van 5 meter

onder het maaiveld, tot <3.5 meter dik op een diepte van 20 meter onder het maaiveld) in relatief dikke pakketten (> 5 meter) niet goed te detecteren zijn.

3. *Storende invloeden.* Geo-elektrische metingen ondervinden storende invloeden van elektrisch geleidende objecten aan of nabij het aardoppervlak. De stroom die met de meting in de aarde wordt gebracht, kan door deze geleiders worden aangetrokken, zodat het stroompatroon verandert en daarmee de berekende weerstand afwijkt. Er moeten dus geen kabels of leidingen in de buurt liggen. De storende invloed is meestal beperkt wanneer de kabels of leidingen loodrecht op de meetrichting van de elektrische sondering staan. Antropogene spanningsbronnen zoals hoogspanningskabels, generatoren, spoorbanen en de kathodische bescherming van gasleidingen, kunnen direct of indirect (d.m.v. inductie)stroom lekken naar de ondergrond. De van nature al aanwezige spanning ('Spontaneous Potential', SP) in de ondergrond, die tijdens de geo-elektrische meting gecompenseerd moet worden, kan hierdoor zeer groot en/of zeer variabel in de tijd (hoog frequent) worden. Dit bemoeilijkt de SP compensatie van het meetinstrument.

#### C.4.3 Continue verticale elektrische sonderingen

Het is mogelijk om gelijktijdig met sonderingen geo-elektrisch onderzoek te doen. Hiertoe wordt de sondeer installatie uitgerust met elektrodes. Continue Verticale Elektrische Sonderingen (CVES) kunnen worden uitgevoerd met diverse instrumenten zoals bijvoorbeeld de door ABEM ontwikkelde Terrameter SAS4000 of de door TNO ontwikkelde GEA58 die recent gebruikt is voor de kartering van het grindpakket langs de Grensmaas.

#### C.4.4 2-D Inversie van de continue geo-elektrische data

Voor de interpretatie van geo-elektrische meetgegevens zijn computerprogramma's beschikbaar waarmee uitgaande van de meetwaarden een lagenmodel van de bodem in twee dimensies kan worden geconstrueerd met behulp van 2D inversietechnieken. Als uitgangspunt voor modelberekeningen dienen de dieptes van bepaalde lagen zoals bekend uit boor of sondeergegevens ingevoerd te worden. Met behulp van 2D inversie worden de laagovergangen daartussen uit de geo-elektrische metingen berekend. Er is een aantal voordelen van de bovenstaande 2-D Inversie van de geo-elektrische data in vergelijking met de conventionele 1-D inversie.

- 1 Bij grote laterale variaties in de ondergrond binnen de geo-elektrische meetopstelling wordt bij een 1-D inversie een verkeerd ondergrond model bepaald; een 2-D inversie kan dit probleem wel hanteren, omdat dit programma een berekend synthetische schijnbare weerstandsprofiel vergelijkt met de gemeten schijnbare weerstanden.
- 2 Bij 2-D inversie worden ook geo-elektrische meetwaarden uit naastgelegen meetpunten meegenomen in de berekening.
- 3 Een 2-D inversie vergt meer computer-, maar minder menstijd dan een 1-D inversie.

Een 2-D inversie kent helaas ook nadelen in vergelijking tot de conventionele 1-D inversie. Kleine laterale weerstandsvariaties (10-20%) binnen een laag (bijvoorbeeld de overgang van zandig grind naar grind met meer silt/klei) worden niet meegenomen in het geïnterpreteerde model. Hierdoor kunnen, als de modelleur het programma vrij laat rekenen, geologisch gezien te grote variaties in de bepaling van dieptes van laaggrenzen over een korte afstand worden berekend.

## C.5 Elektromagnetische methode (EM)

### C.5.1 Inleiding

Elektromagnetische (EM) instrumenten meten de schijnbare geleiding van het bovenste deel van de ondergrond. De schijnbare geleiding is het omgekeerde van de schijnbare weerstand. Een EM instrument bestaat uit een zend- en een ontvangspoel. De methode is vooral geschikt om zijdelingse verschijnselen te bepalen, bijvoorbeeld grondwatervervuiling en geohydrologisch onderzoek. De volgende vier factoren hebben invloed op de schijnbare elektrische geleiding van de ondergrond:

- 1) Hoe zouter het grondwater, hoe groter het aantal ionen in het water is en dus ook hoe groter de schijnbare geleiding van de ondergrond is. Ook andere stoffen die de geleiding van het grondwater beïnvloeden kunnen zo getraceerd worden.
- 2) Doordat de poriën in het sediment in de onverzadigde zone deels met lucht zijn gevuld, is de schijnbare geleiding van de onverzadigde zone kleiner dan die van de verzadigde zone. In gebieden met een lagere grondwaterstand is de conductiviteit dan ook mede afhankelijk van de verhouding tussen lucht en water in de poriën van het sediment.
- 3) Indien de bodemopbouw niet uniform is omdat er bijvoorbeeld ondiepe kleilagen aanwezig zijn, dan kunnen delen met een lage weerstand verkeerd geïnterpreteerd worden als zones met ondiep brak of zout grondwater. Verschillende grondsoorten hebben verschillende soortelijke weerstanden, waarbij ook de pakking van de bodem (of juist de verstoring daarvan) een belangrijke rol speelt.
- 4) Metalen voorwerpen in of vlak boven de grond (bijvoorbeeld leidingen in de ondergrond of schrikdraad aan het oppervlak) kunnen een sterke verhoging van de schijnbare conductiviteit veroorzaken. Het is dan ook verstandig om ver van hekken met schrikdraad of over wegen (waar vaak leidingen onder liggen) te meten.

Als er problemen ontstaan waar contrasten in de soortelijke weerstand van de bodem optreden, dan is het mogelijk om EM technieken te gebruiken. Het equivalentieprincipe is ook bij dit type metingen van toepassing en ijking met aanvullende gegevens is dan ook sterk aan te bevelen. Het is bijvoorbeeld niet mogelijk om op basis van alleen de EM-metingen een onderscheid te maken tussen de laterale overgang van een dieper naar een ondieper zoet/brak grondwatergrensvlak, of de overgang van een zoet/brak grensvlak naar een zoet/zout grensvlak op dezelfde diepte. EM technieken zijn wel goed bruikbaar voor het snel verkennen van grote gebieden en het vaststellen van afwijkende fenomenen in deze gebieden.

### C.5.2 Meettechnieken

Er zijn verschillende meettechnieken beschikbaar om EM metingen uit te voeren. Hieronder worden drie instrumenten nader toegelicht.

De EM 31 is een instrument dat de soortelijke elektrische geleiding van de ondiepe (~ 3 m) ondergrond meet. Een zender wekt een elektromagnetisch veld op dat in ondergrondse geleiders zogenaamde inductiestromen opwekt. Deze inductiestromen veroorzaken een secundaire elektromagnetisch veld dat samen met het primaire veld door een ontvanger gemeten wordt. Het verschil tussen het uitgezonden en het ontvangen elektromagnetische veld levert informatie over de schijnbare geleidbaarheid (het omgekeerde van de schijnbare weerstand) van de ondergrond. De meting is goedkoop en snel; twee personen kunnen 1 tot 3 km profiel per uur meten.

Bij de EM38 wekt een wisselstroom in de zender een (primaire) elektromagnetisch veld op dat in ondergrondse geleiders (de zogenaamde 'Eddy') stromen induceert (zie Figuur C.3). Deze geïnduceerde stromen veroorzaken een secundaire elektromagnetisch veld dat samen met het primaire veld door de ontvanger wordt gemeten. Het verschil tussen het uitgezonden en het ontvangen elektromagnetische veld levert informatie

over de geleidbaarheid van de ondergrond. Door met verschillende spoelstanden te meten kan een kwalitatieve indicatie worden gekregen over de verandering van de weerstand met de diepte.

De NanoTEM is een instrument dat de soortelijke elektrische geleiding van de ondergrond meet tot een diepte van enkele tientallen meters. Bij een TEM ('Time-domain Electromagnetic Measurement') meting loopt een gelijkstroom door een lange draad die in de vorm van een vierkant op de grond ligt. Deze draad is de zender. De stroom die door de draad loopt, genereert een (primaire) elektromagnetische (EM) veld. Dit veld induceert inductiestromen in eventuele geleiders in de ondergrond. Deze inductiestromen genereren op hun beurt een (secondaire) EM-veld. Op tijdstip  $t = 0$  wordt de stroom abrupt uitgeschakeld; het primaire EM-veld valt weg. De ontvangstspoel wordt aangezet. Het in de tijd afnemende, secondaire EM-veld induceert een, eveneens in de tijd afnemende, stroom in de spoel van de ontvanger. Is er een goede geleider in de ondergrond aanwezig, dan duurt het verval van de stroom in de ontvanger relatief lang.



*Figuur C.3 De meetspoelen die gebruikt wordt bij een elektromagnetische meting met EM-38 meetapparatuur.*

### C.5.3 Elektromagnetisch sonderen

EMIS is een elektromagnetisch sonderingssysteem waarmee langs een meetlijn een beeld van de ondergrond in termen van soortelijke elektrische weerstand (resistiviteit) kan worden verkregen. De resultaten van alle elektromagnetische sonderingen langs een meetlijn worden weergegeven in een twee-dimensionaal resistiviteitsprofiel. Dit profiel leent zich voor interpretaties in termen van het al dan niet voorkomen (en op welke diepte) van kleilagen, of watervoerende afzettingen (zand, grind) met verontreinigd of brak grondwater.



## C.6 Boorgatmetingen

### C.6.1 Inleiding

Boorgatmetingen zijn uit te voeren in open boorgaten en in verbuisde boorgaten (zie Figuur C.4) en worden direct na het beëindigen van een boring uitgevoerd. Vooral bij het inrichten van grondwaterwinputten en grondwaterpeilputten zijn boorgatmetingen onmisbaar geworden. Daarbij zijn in-situ parameters ook belangrijk voor de interpretatie van gegevens verkregen uit geo-elektrisch, geo-radar en seismisch onderzoek. Bij het interpreteren van boorbeschrijvingen en het opzetten van een geo(hydro)logisch ondergrondmodel van een onderzoeksgebied zijn boorgatmetingen een zeer bruikbare aanvulling. Boorgatmetingen zijn mogelijk in reeds bestaande grondwaterfilters mits de diameters van de filterbuizen groot genoeg zijn. Ze worden uitgevoerd met apparatuur die in terreinauto's ingebouwd is.



*Figuur C.4 Het aanbrengen van de meetsonde voor boorgatmetingen in een verbuisd boorgat.*

### C.6.2 Toepassing

Boorgatmetingen, verbuisd of onverbuisd, geven informatie over de volgende fenomenen:

- laagopbouw met correcte diepte van o.a. zand- en kleilagen;
- diameter van het boorgat;
- verticale variabiliteit van de lagen;
- inzicht in betrouwbaarheid van de monsters;
- kwaliteit van de boring;
- waterkwaliteit;
- grens tussen zoet en zout water.
- mogelijke inrichting van een grondwaterwininput of een grondwaterpeilput;
- dieptes waarop kleiafdichtingen aangebracht kunnen worden;
- plaatsing van zoutwachters;
- fysische in-situ parameters van de doorboorde lagen die nuttig zijn bij de interpretatie van andere geofysische (zoals seismische en geo-elektrische) technieken zoals: dichtheid, porositeit, soortelijke elektrische weerstand, natuurlijke gammastraling en magnetische karakterisatie van metingen.

Metingen in open boorgaten geven informatie over:

- lithologie (laagopbouw) van de bodem en de waterkwaliteit;
- ontwerp voor de putafwerking;
- in-situ parameters zoals porositeit, dichtheid en elektrische weerstand van de lagen.

Metingen in verbuisde boorgaten geven informatie over:

- productie per meter filter;
- watertemperatuur;
- plek waar kleiafdichtingen zijn aangebracht;
- lithologie en waterkwaliteit;
- in-situ parameters zoals porositeit en dichtheid van de lagen.

### C.6.3 Standaard boorgatmetingen

De toepassingen die hierboven genoemd zijn, worden in Nederland aangeboden in een standaardpakket dat uit vier typen metingen bestaat. Eén meting bestaat uit het één keer op- en neer halen van een specifieke sonde in een boorgat.

#### *Caliper log*

De caliper log meet vernauwingen en verwijdingen in het boorgat (zie Figuur 3.2a in de hoofdttekst). Dit gegeven wordt gebruikt bij de interpretatie van de lithologie en is ook belangrijk bij het berekenen van de hoeveelheid filtergrind en kleiafdichting bij filters. De belangrijkste reden om een boorgatmeting als 'standaardpakket' uit te voeren (dus met de vier verschillende metingen) is het gegeven dat de interpretatie optimaal is als alle logs vergeleken worden en alle gegevens gebruikt worden bij de interpretatie.

#### *Spontane Potentiaal log (SP)*

Het succes van de SP meting is afhankelijk van het verschil in ionenconcentraties tussen het formatiewater en de boorspoeling. Wanneer het verschil groot is, is het mogelijk om permeabiliteitsverschillen vast te stellen (zie Figuur 3.2b in de hoofdttekst). Door de SP-curve te vergelijken met de gamma-ray curve kunnen dunne zandlaagjes in kleipakketten gedetecteerd worden.

#### *Normal log*

Normal-logs (SN en LN) bepalen de formatieweerstand van de doorboorde grondlagen. Beide logs vormen dan ook de belangrijkste logs voor de lithologische interpretatie van een boorgatmeting. De SN en LN worden met één sonde gemeten. Tevens geven deze logs informatie over de waterkwaliteit en de ligging van de grens tussen zoet en zout water (zie Figuur 3.2c en d in de hoofdttekst).

*Gamma-ray log*

De gamma-sonde registreert de aanwezigheid van kleideeltjes die gammastraling uitzenden. De gamma meting registreert dan ook kleilagen. De meting kan zowel in een verbuisd als in een open boorgat worden uitgevoerd. Bij het plaatsen van filters is deze meting onmisbaar. De uitzending van gammastraling uit kleilagen is niet constant. Er treedt statistische variatie op en dat maakt de interpretatie van vooral zeer dunne kleilaagjes moeilijk (zie Figuur 3.2e in de hoofdttekst).

**C.6.4 Aanvullende boorgat metingen***Dichtheid of 'gamma-gamma'*

Bij de dichtheid of 'gamma-gamma' meting worden drie grootheden gemeten: de dichtheid, de diameter van het boorgat en de natuurlijke gammastraling van de formatie. De sonde waaraan de gammastralingsbron ( $\text{Cs137}$ ) is gemonteerd, wordt door een arm aan de sonde tegen de wand van de boorbuis gedrukt. De bron zendt gammastraling van middelhoge energie uit. Deze gammastraling gedraagt zich in het sediment als een bundel hoge-snelheids deeltjes (gammakwanten) die botsen tegen de elektronen in het sediment. Bij elke botsing geeft de gammakwant een deel van zijn energie af aan de elektron. Dit fenomeen noemt men Compton verstrooiing. Op een vaste afstand van de gamma-bron zijn op dezelfde sonde twee gammadetectoren geplaatst die de teruggekaatste gammadeeltjes opvangen. De uitslagen van de beide gammadetectoren zijn een maat voor de elektronendichtheid van het sediment, die op zijn beurt weer gerelateerd is aan de werkelijke dichtheid. De dichtheid is afhankelijk van de dichtheid van het sedimentskelet, de porositeit en de vloeistof in de poriën van het sediment. De sonde is zodanig geconstrueerd dat de gammastraling die gedetecteerd wordt, voor het overgrote deel afkomstig is van het Compton-effect. Het aantal Comptonbotsingen is direct gerelateerd aan het aantal elektronen in het sediment. De dichtheidsmetingen zijn alleen betrouwbaar als ze in de waterverzadigde zone zijn uitgevoerd. De indringingsdiepte van de gamma straling is ongeveer 15 cm.

*Neutronenporositeitsmeting*

De neutronenbron ( $\text{Am241/Be}$ ) in de sonde wordt in een boorgat gehangen en meet alzijdig. Neutronen zijn elektrisch neutrale deeltjes, met een massa die gelijk is aan een waterstofatoom. De radioactieve bron in de sonde zendt voortdurend neutronen uit met een hoge energie. Deze neutronen worden verondersteld volledig elastisch te botsen met atomen in het sediment. Tijdens elke botsing verliest de neutron iets van zijn energie. De hoeveelheid energie die de neutron verliest, hangt af van de massa van de atomen waar de neutronen tegenaan botsen. De grootste energie die een neutron kan verliezen vindt plaats bij een botsing met een deeltje van gelijke massa, b.v. een waterstofatoom. Botsingen met zware atomen remmen de neutronen bijna niet af. Het snelheidsverlies van een neutron hangt dan ook voor het grootste gedeelte af van de aanwezigheid van water in de formatie. Binnen een aantal microseconden worden de neutronen afgeremd tot zo'n lage snelheid dat ze op den duur worden ingevangen door de nucleïden van atomen. Twee sensoren in de sonde, ieder op een andere afstanden van de bron, vangen deze neutronen in. Als de concentratie van waterstof in het omliggende materiaal hoog is, dan zullen de meeste neutronen dichtbij de radioactieve bron sterk worden afgeremd en door de dichtstbijzijnde detector worden geteld. Met een afnemende concentratie waterstof houden de neutronen langer hun energie en zal de verder gelegen detector meer neutronen tellen. Met deze twee detectors kan de concentratie waterstof en dus, bij goede benadering, de concentratie water in de formatie bepaald worden.



*Spectraal gammameting*

Met de gamma spectraal meting is het mogelijk:

- de soort afzettingen te bepalen (lithologie);
- de ligging van grensvlakken te bepalen;
- een correlatie tussen boringen uit te voeren;
- uitspraken te doen over het afzettingsmilieu en de herkomst van de sedimenten.

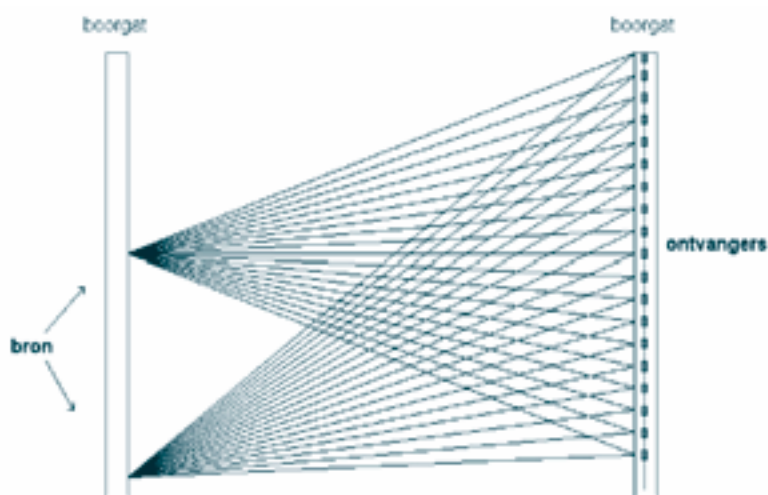
Een spectraal gamma-meting in een boorgat levert gewoonlijk vier logs op. Een gamma totaal meting, d.w.z. de registratie van alle gamma-deeltjes die het meetkristal treffen; een thorium-meting; een uranium-meting; en een kalium-meting.

Metingen van de gehalten thorium, kalium en uranium kunnen hierbij aanvullend worden gebruikt voor een betere bepaling van de lithologie; de identificatie van sommige klei- en zandlagen; identificatie van afzettingsomstandigheden en de oxidatie-reductieomstandigheden.

**C.7 Elektrische en seismische tomografie (TOMOSO)**

De term tomografie is afgeleid van het Griekse woord 'tome', wat doorsnede betekent. De tomografische techniek komt uit de geneeskunde maar wordt de laatste jaren ook in de geofysica toegepast, voor onderzoek naar de dynamische processen tot diep in de mantel van de aarde (aardbevingen en plaattektoniek) en voor de exploratie naar met name olie en gas, en in de civiele techniek. De techniek maakt gebruik van een seismische of een elektrische bron die in een boorgat een signaal afgeeft. Ontvangers aan het aardoppervlak of in een ander boorgat registreren het opgevangen signaal, dat informatie geeft over lagen, lithologie, overgangen en veranderingen in de grondwaterstand (zie Figuur C.5).

In samenwerking met o.a. Fugro Ingenieursbureau BV is het Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen (TNO-NITG) bezig een techniek te ontwikkelen die verschillende tomografische technieken combineert om zo een beter beeld van de ondiepe bodem te krijgen. Dit project heet TOMOSO. Binnen dit project wordt gewerkt aan de ontwikkeling van elektrische weerstandstomografie, seismische tomografie en de mogelijkheid beide principes te combineren. De methoden worden in eerste instantie ontwikkeld als boorgatmetingen maar uiteindelijk is de bedoeling om de meetapparatuur ook in te bouwen in een sondeerconus.



*Figuur C.5 Schematische weergave van een cross-hole seismisch tomografische meting.*

## Inhoud

<b>D</b>	<b>Bedrijfsvoeringaspecten van een grondonderzoek</b>	117
<b>D.1</b>	<b>Inleiding</b>	117
<b>D.2</b>	<b>Wijze van aanbesteding</b>	117
<b>D.3</b>	<b>Inventarisatie van geschikte bedrijven</b>	117
<b>D.4</b>	<b>Opstellen van de offerteaanvraag</b>	118
<b>D.5</b>	<b>Vergelijken van offertes</b>	118
<b>D.6</b>	<b>Overeenkomsten</b>	119
D.6.1	Werkwijze	119
D.6.2	Planning	119
D.6.3	Toezicht	119
D.6.4	Rapportage	120
D.6.5	Boeteclausule	120
D.6.6	Extra kostenposten	121
D.6.7	Onderaanneming	121
<b>D.7</b>	<b>Checklist startbespreking voor de veldwerkzaamheden</b>	122



## D Bedrijfsvoeringsaspecten van een grondonderzoek

### D.1 Inleiding

De (veld-)werkzaamheden in het kader van een bodemonderzoek worden vaak uitgevoerd door externe bedrijven of instellingen. Vooraf aan de uitbesteding van veldwerkzaamheden zal in het algemeen eerst intern een projectplan worden opgesteld met daarin de gewenste resultaten, de doorlooptermijn(en) en een raming van de kosten. Deze bijlage behandelt de voor grondonderzoek afwijkende aspecten in de bedrijfsvoering.

### D.2 Wijze van aanbesteding

Afhankelijk van de omvang van het project verschilt de wijze van aanbesteding. Als het uit te voeren onderzoek kleinschalig is en slechts een korte doorloop tijd heeft, kan gekozen worden voor een opdrachtbon. Het voordeel hiervan is dat deze wijze van aanbesteding snel is. Bij grotere opdrachten met een langere doorlooptermijn moet een overeenkomst gesloten worden tussen opdrachtgever en uitvoerende, waarin de te verrichten werkzaamheden en condities zijn opgenomen. Bij uitbesteding van zeer grootschalige werkzaamheden moet rekening gehouden worden met de mogelijke verplichting van een Europese aanbesteding. Informatie over exacte regels en drempelwaarden is te vinden op [www.egadvies.nl](http://www.egadvies.nl). Het opstellen van een offerte voor een Europese inschrijving is een complexe zaak, waarbij op een nog langere doorlooptijd gerekend moet worden in verband met extra administratieve handelingen.

### D.3 Inventarisatie van geschikte bedrijven

Bij selectie van bedrijven en instanties waarbij offerte wordt aangevraagd is het aan te bevelen om de markt van grondonderzoekbedrijven te verkennen. Een van de mogelijke vragen die de opdrachtgever zich kan stellen, is hoe zwaar de druk zal zijn die de komende opdracht op de markt zal leggen. Hoe verhoudt de gevraagde onderzoeksinspanning zich tot het aanbod op de markt. Bij een voorselectie van mogelijke grondonderzoekbedrijven zijn de volgende punten van belang:

- Heeft de firma ervaring in het gewenste type werkzaamheden (zijn er referenties)? Houd hierbij niet alleen rekening met de technieken die gebruikt gaan worden, maar ook met de toepassing van deze technieken in het bodemtype van het betreffende onderzoeksgebied.
- Is er al eerder door de organisatie gewerkt met deze firma en hoe waren destijds de ervaringen?
- Is de firma gecertificeerd of aangesloten bij een erkende stichting/waARBORG-instantie, etc.?
- Is de firma groot genoeg om het werk te kunnen uitvoeren; is er voldoende back-up bij onvoorziene omstandigheden. (N.B.: een bedrijf moet onderaanneming altijd vooraf kenbaar maken aan de opdrachtgever.)
- Kan de firma aan de gewenste kwaliteitsnormen voldoen? Kan de firma bijvoorbeeld volgens de geldende NEN-norm een korrelgrootte-analyse uitvoeren?
- Heeft de firma voldoende overhead om de administratieve afwikkeling goed te kunnen laten verlopen?
- Is de firma groot genoeg de financiële risico's van het onderzoek te dragen? Indien gekozen wordt voor facturering op basis van nacalculatie, dan bestaat de mogelijkheid dat een bedrijf een grote (langdurige) inspanning moet verrichten voordat betaling plaats kan vinden. Kleinere firma's kunnen hierdoor in betalingsproblemen komen.
- Is de firma onafhankelijk? De uitvoerder mag geen belanghebbende zijn in het uiteindelijke project.

#### D.4 Opstellen van de offerteaanvraag

Een offerteaanvraag moet zo opgesteld zijn dat de potentiële opdrachtnemer zich een zo goed mogelijk beeld kan vormen van de werkzaamheden en verantwoordelijkheden, zoals:

- de uit te voeren werkzaamheden:
  - methode(s),
  - aantallen,
  - dieptes/lengtes,
- de afstand tussen de onderzoekslocaties;
- de afstand tussen de meetpunten;
- de lokale omstandigheden;
- de bodemopbouw en/of de te meten parameters;
- de wijze van beschrijven, b.v. volgens NEN 5104 of een andere geldende standaard;
- de structuur van het project;
- welke werkzaamheden wel en welke niet moeten worden uitgevoerd (bijvoorbeeld het inmeten van meetpunten);
- wie verantwoordelijk is voor wat;
- de tijdspanne waarbinnen de werkzaamheden uitgevoerd moeten worden;
- het gewenst eindproduct en de gewenste rapportage.

In de offerteaanvraag moet duidelijk staan dat de kosten van het aangeboden volgens een bepaalde structuur opgebouwd moet worden. Deze structuur is nodig om de totale kosten na te kunnen rekenen en een inschatting te kunnen maken van eventuele kosten voor meerwerk, minderwerk en wachtgelden. Deze structuur is ook hard nodig om verschillende offertes qua financiële aspecten te kunnen vergelijken. In de gewenste structuur moet het volgende duidelijk staan aangegeven:

- stuksprijzen;
- een prijs per meter, bij boringen en sonderingen, onderverdeeld in:
  - mobilisatie/demobilisatiekosten, en
  - prijs per meetpunt;
  - prijs voor het gehele onderzoek;
  - prijs voor meer- en minderwerk (bijvoorbeeld per meter);
- tarief voor wachtgeld;
- materiaalkosten (eventueel uitgesplitst, bijvoorbeeld bij peilbuizen);
- rapportagekosten;
- interpretatiekosten (indien de interpretaties door de opdrachtnemer uitgevoerd zijn).

Deze structuur maakt het ook mogelijk om per aspect te bekijken hoeveel aandacht de opdrachtnemer er aan geeft.

#### D.5 Vergelijken van offertes

Een offerteaanvraag volgens een gestructureerde kostenopbouw maakt het relatief makkelijk om een goede financiële vergelijking te maken tussen de ingediende offertes. Bij het vergelijken van de offertes moet nadrukkelijk rekening gehouden worden met de prijzen voor meer- en minderwerk. Deze posten kunnen in sommige situaties aanzienlijk in omvang zijn.

Buiten het vergelijken van de financiële aspecten, dient natuurlijk ook de rest van de offertes zorgvuldig vergeleken te worden. Worden bijvoorbeeld alle (onderzoeks-)vragen die in de offerteaanvraag genoemd werden, wel beantwoord? Blijkt misschien uit de offerte dat de aanbieder zich heeft verdiept in de specifieke problemen, c.q. omstandigheden, van het onderzoeksgebied (deels zoals is aangegeven in de offerteaanvraag, maar misschien ook op andere punten die de aanbieder zelf naar voren brengt)?

Bij het vergelijken van de offertes is het ook van belang of alle aanbieders hetzelfde pakket aanbieden. Houden alle aanbieders in het geval van boringen bijvoorbeeld rekening met het uitvoeren van KLIC meldingen en worden de boringen door de aanbieders volgens dezelfde methodiek beschreven? Ook is het belangrijk om na te gaan of de opdrachtnemer over de juiste apparatuur beschikt. Indien niet alle aspecten duidelijk behandeld worden in de offerte, of als er onduidelijkheid bestaat over bepaalde punten, moet de aanbieder geconsulteerd worden.

In sommige gevallen is het niet mogelijk om de offertes op een goede manier te vergelijken. Dat is bijvoorbeeld het geval als alleen het gewenste eindproduct beschreven is in de aanvraag, maar de methode is vrijgelaten. Een vergelijking puur op basis van kosten is in deze situatie sterk af te raden. Er moet in dat geval een inschatting gemaakt worden welke methode de meeste kans van slagen heeft en welke firma het meest op maat gesneden, c.q. doordachte voorstel doet. Is dat niet mogelijk, dan kan er ook gedacht worden aan een proef waarbij de aanbieders de mogelijkheid krijgen de geschiktheid van hun aanpak te demonstreren.

## **D.6 Overeenkomsten**

In een contract komen een aantal zakelijke aspecten aan bod die deels zijn opgenomen in een standaard contract waar een projectorganisatie mee werkt. Hieronder zullen alleen die aspecten worden besproken die bij grondonderzoek als aanvulling worden toegevoegd aan het voorhanden zijnde 'standaard' contracten.

### **D.6.1 Werkwijze**

In het contract moeten de methodes, de te gebruiken materialen (bijvoorbeeld voor het afwerken van peilbuizen) en de te volgen werkwijze duidelijk beschreven worden. Ook de gewenste frequentie waarop gemeten of bemonsterd moet worden, dient in het contract te staan. Verder moet het contract aangeven volgens welke normen (inhoudelijk en met betrekking tot veiligheid) gewerkt moet worden. Het te gebruiken materiaal moet zoveel mogelijk gestandaardiseerd zijn (bijvoorbeeld de diameter van de boorbuis). Op deze manier kan worden voorkomen dat door de inzet van verschillend materieel een systematisch verschil in de data ontstaat.

### **D.6.2 Planning**

In het contract moet de planning van de werkzaamheden aangegeven worden. Bij het opstellen van de planning moet er rekening gehouden worden met een reële doorlooptermijn van het onderzoek, dus ook vakanties en de mogelijk invloed van het weer moet in de planning opgenomen worden. Het betreft hier immers veldwerk dat niet onder alle omstandigheden kan worden uitgevoerd (denk bijvoorbeeld aan vorstverlet). De bepaling of een dag werkbaar is of niet, is vastgelegd in de CAO van de betreffende bedrijfstak.

### **D.6.3 Toezicht**

De werkzaamheden in het veld moeten worden begeleid door toezichthouders (eventueel ingehuurd) die namens de opdrachtgever optreden. Deze mensen moeten de voortgang van de werkzaamheden controleren en moeten meewerken aan een zo goed mogelijk verloop van de werkzaamheden in het veld. De toezichthouders zijn dus niet enkel 'controleurs', maar hebben ook een ondersteunende taak. Zij zijn vaak ook betrokken bij het regelen van de toestemmingen tot betreding van de percelen en de verdere (logistieke) afhandeling van de werkzaamheden in het veld.

#### D.6.4 Rapportage

De uitgevoerde werkzaamheden en gebruikte methodieken dienen door de opdrachtnemer duidelijk en volledig te worden gerapporteerd. In een contract moet duidelijk aangegeven staan welke onderdelen de rapportage minimaal moet bevatten en hoe de procedure en doorlooptijd van concept tot definitief goedgekeurd rapport verlopen gaat.

Indien de werkzaamheden een relatief lange doorlooptermijn hebben, kan er voor gekozen worden om de opdrachtnemer voortgangsrapportages te laten opstellen. Daarin moet staan hoever de uitvoering van het project is, of alles volgens planning loopt en of er werkzaamheden zijn uitgevoerd die vallen onder meerwerk. Het strekt tot de aanbeveling om regelmatig voortgangsoverleg tussen opdrachtgever, opdrachtnemer en toezichthouder(s) te hebben. Tijdens dit overleg kunnen de lopende werkzaamheden besproken worden en kunnen problemen gesignaleerd en opgelost worden. Wijzigingen in het onderzoeksplan kunnen tijdens zo'n overleggen besproken worden en tevens kan overleg gevoerd worden over zaken als wachtgeld, meer- en minderwerk en planning, en details die niet in de overeenkomst genoemd worden. Van elk voortgangsoverleg moeten notulen gemaakt worden die aan de uitvoerenden worden overhandigd en opgenomen moeten worden in de lopende overeenkomst.

Buiten een eindrapportage kan het voor sommige werkzaamheden belangrijk zijn om een dagrapportage te maken. Daarin worden de werkzaamheden, de productie en andere opmerkingen per dag vastgelegd. Dit type rapportage kan in een later stadium van het project handig zijn ter controle van de veldgegevens en rekeningen (bijvoorbeeld van het aantal wachturen). Het aantal exemplaren van deze rapportages dient in het contract genoemd te worden. Zowel in het concept als in de eindrapportage moet rekening gehouden worden met het aantal benodigde werk-, archief- en administratie-exemplaren.

#### D.6.5 Boeteclausule

Een boeteclausule is dat deel van het contract waarin de financiële consequenties voor de uitvoerende worden beschreven bij te late op levering van de resultaten. De hoogte van dit bedrag moet in verhouding staan tot de hoogte van de (te verwachten) aanneemsom. Is het bedrag te klein ten opzichte van de totale aanneemsom, dan zal de uitvoerende weinig druk voelen om op tijd te leveren. Is dit bedrag te hoog dan vormt de planning een risico voor de uitvoerende en zal deze hiermee rekening houden bij het berekenen van de aanneemsom. Deze zal dan in veel gevallen hoger uitvallen. De boete wordt vaak uitgedrukt in een bepaald bedrag per dag 'te laat opgeleverd'. De hoogte van de boete hangt af van de opgetreden vertraging vergeleken met de doorlooptijden van het onderzoek. Een uitloop van enkele dagen zal voor een onderzoek met een doorlooptijd van een jaar minder grote consequenties hebben dan bij een project met een doorlooptijd van enkele weken. De boeteclausule moet gezien worden als een stok achter de deur om de uitvoerende te verplichten de werkzaamheden volgens planning uit te voeren. Een boeteclausule dient een 'uitnodiging' te zijn voor de opdrachtnemer om in een zo vroeg mogelijk stadium contact op te nemen met de opdrachtgever als het vermoeden bestaat dat de geplande opleveringsdatum niet gehaald wordt. Wanneer er sprake is van een plausibele reden voor de vertraging, dan kan naar een oplossing gezocht worden zonder dat de boeteclausule in werking hoeft te treden. Het spreekt vanzelf dat de boeteclausule niet geldt wanneer de uitvoerende niet op tijd kan leveren door toedoen van de opdrachtgever. In een contract dient dan ook nadrukkelijk beschreven te worden wanneer een vertraging te wijten is aan de uitvoerende en wanneer het de schuld is van de opdrachtgever. Hierbij kan gedacht worden aan onder andere:



- toegankelijkheid van percelen;
- overmacht;
- materiaalpech;
- project specifieke omstandigheden (b.v. periode van hoogwater);
- inzet van te weinig materieel.

Natuurlijk kan ook in overleg afgesproken worden om de datum van de eindoplevering uit te stellen, waarmee de ingangsdatum van het instellen van de boetclausule dan ook automatisch opgeschoven wordt. Dit dient overigens wel schriftelijk te worden vastgelegd.

#### **D.6.6 Extra kostenposten**

In een contract moeten duidelijke afspraken gemaakt worden over mogelijke extra kostenposten. Deze zijn ruwweg in twee aspecten te splitsen:

- *Meer- of minderwerk.* Voor boorwerkzaamheden bijvoorbeeld geldt dat er per extra geboorde meter betaald moet worden, uitgaande van een gemiddelde boorlengte. Indien blijkt dat de boringen gemiddeld dieper of ondieper moeten worden uitgevoerd dan gepland, dan worden deze kosten verrekend op basis van een vooraf vastgestelde meer/minder prijs per geboorde meter. De prijs voor meerwerk is hoger dan de standaardprijs; de verdiensten door minderwerk zijn lager dan de standaardprijs. Als de boringen gemiddeld dieper worden dan gepland, dan kan dit een aanzienlijke extra kostenpost opleveren. Minderwerk levert daarentegen relatief weinig op.
- *Wachtgeld.* Als de boorploegen gedwongen worden de werkzaamheden stil te leggen, dan kan dit mogelijk resulteren in het betalen van wachtgeld. In welke gevallen er wachtgeld moet worden betaald, dient beschreven te staan in de overeenkomst. Hierbij kan bijvoorbeeld gedacht worden aan het ontbreken van toestemming om het onderzoeksterrein te kunnen betreden. Ook deze post kan leiden tot een overschrijding van het geraamde budget.

#### **D.6.7 Onderaanneming**

Het is mogelijk dat een aannemer werkt met onderaannemers, bijvoorbeeld als de beschikbare capaciteit binnen het eigen bedrijf niet afdoende is. Onderaanneming dient altijd vooraf kenbaar gemaakt te worden aan de opdrachtgever. In een overeenkomst moet dan ook duidelijk aangegeven worden wat het maximale aandeel van onderaanneming mag zijn. Wanneer het aandeel van de onderaanneming (te) groot wordt, dan ontstaan er bij grondonderzoek vaak problemen:

- De waarborging van kwaliteit en continuïteit wordt complexer mede door de frequente wisselingen in personele bezetting.
- Er kunnen problemen ontstaan met certificering en normering (is de onderaannemer ook gecertificeerd).
- Het wordt lastiger om na te gaan wat door wie en wanneer is uitgevoerd (de 'nazorg').
- Er bij de gunning bewust gekozen is voor die bepaalde aannemer. Het is dan ook ongewenst dat afgewezen aannemers via de onderaanneming alsnog bij het project betrokken raken.

## D.7 Checklist startbespreking voor de veldwerkzaamheden

Het is aan te bevelen om het verslag van de startbespreking op te nemen in de overeenkomst. Een startbespreking geeft een praktische invulling gegeven aan alles wat tot op dat moment in het contract en de offerte beschreven is. Onderstaande lijst, die afkomstig is van De Maaswerken, geeft een indruk van het type afspraken dat bij een startbespreking voor veldwerkzaamheden wordt gemaakt.

Taak: Start werkzaamheden	Omschrijving:
Betreding percelen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Eigenaren inlichten door juridische afdeling van opdrachtgever</li> <li>- Gebruikers inlichten door toezichthouder van opdrachtgever</li> </ul>
Kabels en leidingen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Klic-melding uitvoeren door opdrachtnemer</li> <li>- Opdrachtgever verzorgt een tekening met alle daarop bekende kabels en leidingen</li> </ul>
Aangeleverde gegevens en tekeningen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lijst met boorputnummers en coördinaten in Excel</li> <li>- Tekeningen met boorpunten en labels (NITG- en boorputnummers)</li> <li>- Tekeningen op schaal met x- en y-raster</li> </ul>
Maatvoering op het water	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nauwkeurigheid in x en y is 0,5 m; nauwkeurigheid in z is 0,02 m</li> <li>- RWS controleert steekproefsgewijs boorlocaties op x-, y-, z-coördinaten.</li> <li>- Bepalen van methode die wordt gehanteerd?</li> <li>- Besluiten door wie wordt het gedaan?</li> <li>- Waterpeil gebruiken als referentievlak voor NAP- hoogte</li> <li>- x- en y-punten vanaf de wal inmeten of met DGPS in het vaartuig</li> </ul>
Verpakking monsters	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Milieuboringen</i>: potten van 720 ml worden op aanvraag aangeleverd door opdrachtnemer met voorbedrukte code RWS-G en daarop geregistreerde barcodes.</li> <li>- <i>Diepe boringen</i>: emmers van 12 liter worden geleverd door RWS De Maaswerken inclusief pallets. Per boring dient één pallet te worden gebruikt.</li> </ul>
Levering monsters	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Milieuboringen</i>: opdrachtnemer draagt zelf zorg voor dagelijks afhalen van monsters</li> <li>- <i>Diepe boringen</i>: pallets met monsters worden in overleg met toezichthouder afgehaald door koerier</li> </ul>
Registratie in het veld	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Barcodes scannen</li> <li>- Veldcomputer met 'Boormanager 3.0'</li> <li>- Potten voorzien van labels met NITG-code en monstertraject en/of een lijst bijhouden met barcodes, NITG-codes en monstertrajecten</li> <li>- Per fax een uitdraai maken van 'Boormanager'</li> </ul>
Boorgegevens	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 'Boormanager'-dump en/ of NAZCA-export naar e-mailadres sturen</li> </ul>
Afwerking boorgaten	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Boorgaten GOED opvullen; na boorcampagne nalopen en opvullen met kleikorrels</li> </ul>
Rapportage	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Conceptrapportage: <ol style="list-style-type: none"> <li>1) boorbeschrijving op papier</li> <li>2) methodische verantwoording</li> <li>3) verslaglegging van de werkzaamheden</li> </ol> </li> </ul>
Oplevering werk	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 'Boormanager'-dump en/of NAZCA-export</li> <li>- Boorbeschrijvingen op papier</li> <li>- Verslaglegging van de werkzaamheden</li> </ul>
Opmerkingen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Boorlocaties zijn vanaf kaart geprojecteerd; het kan in de praktijk voorkomen dat het niet mogelijk is een boring te zetten. Er dient dan in overleg met de projectleider een aangepaste boorlocatie te worden bepaald.</li> </ul>

## Literatuur

- [Blaquière G., 1997] Maaswerken 'Wat-Vraag' TNO-Rapport HAI-RPT-970082 van TNO fysieke Dienst TU Delft in opdracht van De Maaswerken. 25 pp.  
(werk inventariseert onderzoeksvragen met betrekking tot waterbodemonderzoek vooraf aan uitvoering van de Maaswerken) rapport te downloaden via <http://www.waterland.net/ms2000/verslagen/rapporten/index.html>.
- [Bosch, J.H.A., 2001] Standaard Boor Beschrijvingsmethode, versie 5.1. NITG TNO rapport 00-141-A, 91 p.p.
- [Bosch, J.H.A., A. van Ruiten en M.J. van der Meulen, 2002] Grondonderzoek Ruimte voor Bovenrivieren (RVBo) op basis van beschikbare gegevens. Rapport met kaart-bijlagen en CD-rom, Publicatiereeks Grondstoffen 2002/17: Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Delft 142 pp.
- [Bremmer, C., Dubelaar, C.W., Floris, K., Veldkamp, J.G. and B. Wassing, 2000] Methodiek opbrengstberekeningen en schatting onzekerheden voor project Maaswerken. NITG TNO rapport 99-203-C uitgebracht in opdracht van De Maaswerken 127 p.p.
- [Burrough, P. & McDonnell R.A., 1998] Principles of Geographical Information Systems. Oxford University Press. 333 p.p.
- [CUR, 1996] Geofysische technieken voor grondonderzoek. Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving (CUR) rapport 182. CUR, Gouda, 167 p.
- [CUR, 2000a] 'Biesbosch' Beslissingsondersteunend systeem voor mariene geofysische verkenningstechnieken' CUR-rapport 2000-5, Gouda, 47 pp. (inclusief software).
- [CUR, 2000b] Risman Methode, een instrument voor risico management van grote infrastructurele projecten. Handleiding uitgebracht door het Kenniscentrum Risman, Postbus 420, 2800 AK, Gouda, tel 0182-540635, internet: [www.risman.nl](http://www.risman.nl).
- [Davis, J.C., 1986] Statistics and Data Analysis in Geology, second edition, Wiley & Sons , 646 p.p
- [Drenkelford, A.J., 1989] Integraal grondonderzoek geeft beter resultaat: met boringen, sonderingen en geofysische technieken dijken beoordelen. Land en water Vol 29, nr. 6, p. 44-49.
- [Dubelaar, C.W., M.P.E. de Kleine, B. Klijnstra, V.C. Marges, C.S. Mesdag, C. den Otter, J.G. Veldkamp, H.J.T. Weerts, M.W.I.M. van Heijst & T.P.F. Koopmans, 2002] Inventarisatie van diepe Nederlandse geologische grindreserves. Rijkswaterstaat, Publicatiereeks Grondstoffen 2002/24. Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Delft. 61 p.p.
- [Dufour, F.C., 1998] Grondwater in Nederland. Geologie van Nederland, deel 3. TNO-NITG, 265 p.p.
- [Gruijters, S.H.L.L. en L.W.A. Zwang, 2001] Handleiding programma OPBRENGST, programma voor opbrengstberekeningen delfstoffen op basis van korrelverdelingen. Publicatie Grondstoffenreeks Rijkswaterstaat Dienst Weg en Waterbouwkunde W-DWW-2001-015. 19.pp inclusief software.

[Gruijters, S.H.L.L., H.J.T. Weerts, M.P.E. de Kleine, D. Maljers, M.W.I.M. van Heijst & M.J. van der Meulen, 2002] Grondonderzoek Ruimte voor Benedenrivieren (RVBe) op basis van beschikbare gegevens. Rapport met kaartbijlagen en CD-rom, Publicatiereeks Grondstoffen 2002/18: Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Delft 140 pp.

[Kinneging, N., 1998] Inventarisatie Akoestische Meetsystemen. Rijkswaterstaat Meetkundige Dienst, Delft Rapport MDGAP – 9812.

[Kruyt N.M. & L. Hazelhoff, 1998] Toepassing van geostatistiek bij waterbodems. Rijkswaterstaat Meetkundige Dienst, Programma Meetstrategie 2000+ rapport MS2000+.98.09 rapport te downloaden via <http://www.waterland.net/ms2000/verslagen/rapporten/index.html>

[Kruyt N.M. & Van Oort R.C., 1999] Bodem beter bemeten. Innovatieve Survey van de Waterbodem. Rijkswaterstaat Meetkundige Dienst, Programma Meetstrategie 2000+ rapport MS2000+.99.04 rapport te downloaden via <http://www.waterland.net/ms2000/verslagen/rapporten/index.html>

[NNI, 1989] NEN 5104, Classificatie van onverharde grondmonsters, Nederlands Normalisatie-instituut, Delft, 23 pp.

[NNI, 1996] NEN-EN 933-1 Beproevingsmethode voor algemene eigenschappen van toeslagmaterialen. Deel 1: Methode voor monsterneming. Nederlands Normalisatie-instituut, Delft, 27 pp.

[NNI, 1999] NEN5740/C1 Bodem. Onderzoekstrategie bij verkennend onderzoek. Onderzoek naar milieuhygiënische kwaliteit van bodem en grond. Nederlands Normalisatie-instituut, Delft.

[Montfrans, H.M., L.W.S. de Graaff, J.M van Maurik & W.H. Zagwijn, 1988] Geologie van Nederland deel 2, Delfstoffen en samenleving. Rijks Geologische Dienst Haarlem.

[Scheffer, F.N. 2000] Richtlijn milieuchemisch bodemonderzoek Maaswerken. Maaswerken rapport DLB 2001/1845, 29 p.p.

[Swan, A.R.H. & Sandilands, M., 1995] Introduction to Geological Data Analysis, second edition, Blackwell Science Ltd. 446 p.p.

[Van Bracht, M.J., 2001] Made to Measure, information requirements and groundwater level monitoring networks. Proefschrift, uitgebracht door TNO-NITG, 211 p.p.

[Van Dam, R.L., 2001] Causes of ground-penetrating radar reflections in sediment. Proefschrift, Vrije Universiteit van Amsterdam, 110 p.p.

[Van der Meer M.T., Gruijters, S.H.L.L., Wiggers, A.G. & O. Kapetina, 1998] Probablisme in de geotechniek, richtlijn optimaal grondonderzoek. Fugro rapport K-0003 uitgebracht in opdracht van de Rijkswaterstaat, Dienst Weg en Waterbouwkunde in samenwerking met Grondmechanica Delft.

[Van der Meulen, M.J., F. Lang, D. Maljers, C.W. Dubelaar, W.E. Westerhoff, 2002.] Grondsoorten en delfstoffen bij Naam. Woordenboek van Nederlandse grondsoorten en gesteenten, en daarvan vervaardigde grondstoffen. Publicatiereeks Grondstoffen 2002/21. Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Delft. 88 pp.

[Van Heijst, M.W.I.M. & S.T. Modder, 2001] Haalbaarheidsstudie Diepwinning Beton- en Metselzand. Rijkswaterstaat, Publicatiereeks Grondstoffen 2001/13. Dienst Wegen Waterbouwkunde, Delft. 59 p.p.

[Vogel, W., Staverman W.H. & C.A.H.M. van Isselt, 1998] Inventarisatie van technieken voor inwinning van gegevens over oppervlakte geometrie, laaggrenzen, bodemsamenstelling en chemische samenstelling. Fugro rapport N-0481 in opdracht van Rijkswaterstaat programmabureau Meetstrategie 2000+ Meetkundige Dienst, Delft. 60 pp.

[Wassing, B.B.T., J.G. Veldkamp & C.N. Bremmer, 2002] Opbrengstberekeningen voor beton- en metselzand, Tijdschrift Geotechniek, Jaargang 6, nummer 3, blz. 54-61.

[Weerts, H.J.T., P. Cleveringa, J.H.J. Ebbing, F.D. de Lang & W.E. Westerhoff, 2000] De lithostratigrafische indeling van Nederland – Formaties uit het Tertiair en Kwartair, TNO-rapport NITG 00-95-A, 38 pp.

[Zagwijn, W.H. en van Staalkamp C.J., 1975] Toelichting bij geologische overzichtskaarten van Nederland. Rijks Geologische Dienst. 144 p.p.

[Zagwijn, W.H., 1991] Nederland in het Holoceen, uitgave Rijks Geologische Dienst, Haarlem.



## Index van trefwoorden

Aanbesteding	117	Dekzanden	80
Ackermann bussen	90	Deltaplan Grote Rivieren	7
Ackermann steekboring	90	Dichtheidsmetingen	66, 113
Afstandklasse	52	Differentiated Global Positioning System (DGPS)	33
Afwerking boorgaten	33	DINO (Databank Informatie Nederlandse Ondergrond)	14
Anulus	92	Divers	32
Archeologische vondsten	63	Doorlooptijd	25
Artesisch water	25	Edelmanboor	86
Avegaarboring	93	Eem Formatie	77
Baggerspeciedepots	5	Eemien	77
Bedrijfsvoeringsaspecten	117	Elektrisch sonderen	96
Begemann boring	94	Elektrische en seismische tomografie (TOMOSO)	114
Bemonstering	27	Elektromagnetische methode (EM)	109
Bentoniet	33	Eolisch	74
Bereikbaarheid	25	Eolische afzettingen	13, 80
Betrouwbaarheid	15	Equivalentie	107
Bijmenging	8	Erkende boorbedrijven	99
Bodembewegingen	71	Experimenteel variogram	52
Bodemgebruik	25	Exploratory Data Analysis (EDA)	46
Bodemgesteldheid	25	Fluviatiel	74
Bodemopbouw	12, 16	Fluviatile afzettingen	78
Bodemverontreiniging	5	Fluvioperiglaciaire afzettingen	80
Boeteclausule	120	Formatie	11
Boorbeschrijving	27	Formatie van Breda	77
Boorgatmetingen	17, 111	Formatie van Drente	79
Boormethoden	85	Formatie van Echteld	79
Boorvloeistof	17	Formatie van Kreftenheye	78
Bouwgrondstoffen	5	Formatie van Landen	76
Breuken	13	Formatie van Maassluis	76
Breuksystemen	72	Formatie van Naaldwijk	77
Breukwerking	13	Formatie van Nieuwkoop	79
Brongebied	12	Formatie van Peelo	79
Bruinkool	13, 81	Formatie van Twente	79
Caliper log	112	Formatie van Urk	78
Casing	98	Funderingsrestanten	63
Claims	64	Fysieke scheiding	44
Clusteranalyse	49	Gamma-ray log	113
Conditionele simulatietechnieken	57	Gekernde boringen	17, 85
Continue Verticale Elektrische Sonderingen (CVES)	108	Geo-elektrische methode	107
Contract	119	Geodoff	99
Conusweerstand	95	Geofysische methoden	18, 103
Corebarrels	92	Geografische Informatie Systemen (GIS)	39
Correlatiestructuur	52	Geologie van Nederland	71
Counter flush boring	90	Geologisch scheidingsvlak	44
Cumulatieve zeefkrommes	27	Geologische kartering	12
Data-acquisitie	40	Georadar	104
Databeheer	39	Geostatistiek	58
Databorging	39	Geostatistische interpolatie methoden	52
De Maaswerken	7		
Deformatie	13		
Deklaag	9		



Gesimuleerd laagvlak	57	Luchtliftboring	92
Gestuwde afzettingen	13, 75	Maasroute	7
Gewas- en structuurschade	25	Marien	74
Glacigene afzettingen	13, 79	Mariene afzettingen	13, 76
Glaciofluviale afzettingen	79	Mechanisch sonderen	96
Glaciolacustriene afzettingen	80	Mengmonsters	27
Glauconiet	77	Mikoliet	33
Grenismaas	7	Milieu Effect Rapportage (MER)	51
Grensvlak deklaag	9	Milieuchemisch bodemonderzoek	27
Grensvlak toutvenant	9	Milieuhygiënisch onderzoek	5
Grid	45	Milieuhygiënische scheiding	44
Gridcel	45	Mobiele laag	19
Grondmonsters	27	Monsterbeschrijving	30
Grondmorenes	80	Monstergrootte	29
Grondradar	104	Monsterverdeelapparaat	89
Grondwaterbeschermingsgebieden	36	Morfologische ontwikkelingen	44
Grondwaterkwaliteitsmetingen	32	NanoTEM	110
Grondwatermeetnet	32	Nauwkeurigheid	15
Grote-diameter boringen	30	Nazakken	33
Ground penetrating radar (GPR)	104	Neutronenporositeitsmeting	113
Gutsboring	87	Normal log	112
Handboringen	86	Nugget	53
Handpulsboor	88	Offerteaanvraag	118
Histogram-analyse	47	Onderzoeksintensiteit	21
Hoge Resolutie Seismiek (HRS)	106	Onderzoeksmethoden	21
Holle avegaarboring	91	Onderzoeksvraag	15
Holoceen	71	Ontheffingen	26
Hoogwatergeulen	24	Ontsluiting	11
In-situ dichtheden	66	Ontwerpfase	15
Industriezanden	5	Opbrengstberekeningen	44
Inspraakprocedures	64	Oppervlakedelfstoffen	5
Interpretatie van veldgegevens	43	Peelhorst	73
Inversietechnieken	108	Peelrandbreuk	73
Kabels en leidingen	37	Peilbuizen	32
Klassieke steekproefbenadering	50	Plaatsbepaling	33
Kleibergingen	23	Pleistoceen	76
Kleilaag van Wijchen	79	Potentiaalverschil	107
KLIC (Kabels en Leidingen)		Potklei	80
Informatie Centrum)	37	Profielen	12
Klimaatwisselingen	71	Programma van Eisen (PvE)	64
Knijperboring	91	Pulsboorsysteem	89
Korrelgrootteverdeling	27	Puntinformatie	12
Kosten van een grondonderzoek	19	Ramguts- of trilboring	94
Kriging interpolatietechniek	55	Range	53
Kriging Standaard Deviatie (KSD)	55	Rapportage	32
Kruisvalidatie	54	Reflector	19
Kustvlakte	78	Risico-analyse	63
Kwartair	71	Rivierafzettingen	12, 13
Laagpakketten	11	Riviergeulafzettingen	13
Laterale variatie	13	Rivierterrasafzettingen	11
Lijninformatie	12	Rivierverruiming	4
Liners	28	Roerdalslenk	73
Lithostratigrafie	11	Roterend boren	92
Locale watersituatie	25	Roterend omgekeerd spoelen	90
Löss	13, 80	Ruimtelijke correlatiestructuur	52

Scatterdiagram	54	Verwachtingswaarde	15
Schaderegelingen	36	Vibracorer	98
Sedentaten	81	Volume risk curve	61
Seismisch onderzoek	18	Volumeberekening	60
Semivariantie	52	Voortschrijdend inzicht	16
Sequentiële Gaussische Simulatie' (SGS)	58	Waterbodems	35
Sill	53	Waterpastoestel	33
Simulaties	57	Weerdverlaging	23
SOBEK	44	Weersinvloeden	25
Software	44	Werkruimte	25
Sondeerconus	95	Werkwater	25
Sonderen	95	Winterbed	24
Sonderingen	18	Wrijvingsweerstand	95
Sonderingstechnieken	85	Zandmaas	7
Specifieke weerstand	107	Zeespiegelveranderingen	71
Spectraal gammameting	114	Zomerbed	24
Spiraalboor	93	Zuigboor-luchtlift boorsysteem	92
Spoelboren	92	Zwelklei	33
Spoelboringen	17, 85	Zwelkokers	33
Spoelsonderingen	96		
Spontane Potentiaal log (SP)	112		
Standaard boorbeschrijvingsmethode	30		
Startbespreking	122		
Startmodel van de ondergrond	11		
Stationariteitsaanname	52		
Steekbuis	28		
Steekbussen	28		
Steekproef	50		
Stoorlaag	9, 46		
Straight flush boringen	92		
Stroomgeulverbreding	23		
Stuwwallen	75		
Substraat	9		
Taartpuntdiagrammen	14		
Tertiair	71		
Theodoliet	33		
Toestemming	36		
Toeziethouders	119		
Tomografie	114		
Toutvenant	9		
Triangular Irregular Network (TIN)	45		
Typelocatie	11		
Uitbijters	47		
Utrechtse Heuvelrug	75		
Van der Staay zuigboor	87		
Variantie	50		
Variogrammodel	53		
Veen	13, 81		
Veldwerk	25		
Verbuisd boorgat	98		
Vergunningen	36		
Verificatie van de veldgegevens	46		
Verkeersvoorzieningen	26		
Vervuilingssklasse	45		





