

TNO-rapport
NITG 97-191-B

Geofysisch onderzoek te Austerlitz

Georadar, HRS en SRS metingen voor een
gedetailleerde karakterisatie van een DNAPL
locatie

Datum

september 1997

Auteur(s)

dr. J.A.C. Meekes
drs. R.A. van Overmeeren

Schoemakerstraat 97
Postbus 6012
2600 JA Delft

Telefoon 015 269 69 00
Fax 015 256 48 00

Projectnummer

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

Indien dit rapport in opdracht werd
uitgebracht, wordt voor de rechten en
verplichtingen van opdrachtgever en
opdrachtnemer verwezen naar de
'Algemene Voorwaarden voor
onderzoeksopdrachten aan TNO', dan
wel de betreffende terzake tussen de
partijen gesloten overeenkomst.
Het ter inzage geven van het
TNO-rapport aan direct belang-
hebbenden is toegestaan.

© 1996 TNO

Opdrachtgever
NOBIS

Samenvatting

Op en rond een verontreinigde locatie te Austerlitz zijn hoge resolutie geofysische metingen uitgevoerd om de opbouw van de ondiepe ondergrond gedetailleerd in kaart te brengen. De toegepaste geofysische exploratiemethoden zijn georadar (Ground Penetrating Radar of GPR) en hoge resolutie seismiek (HRS). Deze methoden, die aan elkaar verwant zijn omdat ze beide gebaseerd zijn op golfvoortplanting in de bodem, zijn complementair. Georadar kijkt (onder gunstige omstandigheden) maximaal 40 m diep, terwijl HRS informatie geeft vanaf een diepte van 20 à 30 m. Beide methoden leveren afbeeldingen van de ondergrond in continue secties met lateraal een grote resolutie.

In tegenstelling tot de verwachte gestuwde opbouw van de bodem in het onderzochte gebied bij Austerlitz, bleek uit het, als eerste uitgevoerde, georadaronderzoek dat de gelaagdheid subhorizontaal is. Het reflectiepatroon is kenmerkend voor spoelzandwaaierafzettingen (sandr). De uit de radarmetingen afgeleide diepte tot de grondwaterspiegel bedraagt 8-12 m-mv en lag daarmee gemiddeld ook dieper dan verwacht. De maximale doordringing van de 100 MHz radargolven bleef beperkt tot de grondwaterspiegel. Met een frequentie van 50 MHz werd een grotere diepte bereikt (ongeveer 15 m-mv). Er zijn over het gehele waargenomen dieptebereik geen reflecties met grote amplitude en continuïteit zichtbaar, welke met slecht doorlatende klei- of lemlagen gecorreleerd kunnen worden. Deze resultaten van het georadaronderzoek hadden twee gevolgen voor het seismisch onderzoek:

1. de grotere diepte van de grondwaterspiegel maakte het spuiten van de schotgaten praktisch onmogelijk en noopte tot de inzet van een boormachine;
2. de geringere doordringing van de radargolven veroorzaakten een hiaat in het dieptebereik dat met de geofysische metingen zou worden afgebeeld.

Om te trachten dit hiaat op te vullen, zijn aanvullende metingen uitgevoerd met een nieuwe geofysische techniek, welke gebruik maakt van schuifgolven (S-golven) in plaats van drukgolven (P-golven). Deze S-golven (hoge resolutie) reflectieseismiek (SRS), die gegevens verschaft vanaf ca. 5 m diepte, kon experimenteel worden ingezet dankzij het recent beschikbaar komen van een prototype van een S-golf vibrator.

De georadarsecties laten zien dat er over het gehele waargenomen dieptebereik (i.e. tot 10 à 15 m-mv) geen slecht doorlatende klei- of lemlagen met enige continuïteit aanwezig zijn. Uit de P -golf HRS secties blijkt een eerste continue significante reflectie zich te bevinden op een diepte van ongeveer 45 m-mv. Mogelijk is deze reflectie afkomstig van een scheidende klei- of lemlaag. In de directe omgeving van de verontreinigingsbron langs de Oude Postweg, ontbreekt deze reflectie en zou een eventueel scheidende laag hier derhave afwezig zijn. Een volgende sterke continue reflectie wordt waargenomen op een diepte van ongeveer 120 m-mv langs het gehele profiel.

De resultaten van de S-golf seismiek lijken teleurstellend. In de sectie zijn praktisch geen significante reflecties zichtbaar. Het is vooralsnog onduidelijk of de afwezigheid van reflecties voortkomt uit onvoldoende sterkte en penetratie van de S-golven of te grote storende invloed van opgewekte oppervlakte golven (*‘Love waves’*) of moet worden toegeschreven aan een gebrek aan fysisch contrast in de ondiepe zone. Verder onderzoek met de S-golf methode is nodig om hierover duidelijkheid te verkrijgen.

Geconcludeerd kan worden dat de ondiepe ondergrond op en rond de verontreinigde locatie te Austerlitz gekarakteriseerd kan worden door een horizontale laagopbouw, die grotendeels uit zand en grind bestaat en waarin slecht doorlatende afzettingen met enige laterale verbreiding ontbreken. Als gevolg daarvan zal een in de bodem lekkende DNAPL infiltreren en grotendeels verticaal migreren tot op een diepte waarop zich de eerste klei- of leemlaag bevindt. Op kleinere schaal is het mogelijk dat de DNAPL zal uitsmeren over meer weerstand biedende lemige of fijnzandige laagjes; deze hebben echter een zeer beperkte laterale afmeting (ca. 10 à 15 m), zodat de DNAPL aan de rand verder naar beneden zal migreren. De eerste continue slecht doorlatende klei- of leemlaag lijkt zich te bevinden op een diepte van 120 m-mv.

De toepassing van complementaire geofysische exploratiemethoden met hoge resolutie, i.e. GPR en HRS heeft een goed beeld van de ondergrond gegeven en dient als voorbeeld voor vergelijkbaar onderzoek. Het succes van beide methoden is echter afhankelijk van zowel de bodemopbouw als de terreinomstandigheden en moet per locatie vooraf worden geëvalueerd. Deze parameters bepalen ook de grootte van een mogelijk hiaat in het dieptebereik en de noodzaak om een dergelijk hiaat op te vullen met S-golf seismiek. Al deze factoren zijn meegenomen in een aanzet tot een protocol voor de inzet van geofysische exploratiemethoden bij een gedetailleerde karakterisatie van de ondergrond in de omgeving van een verontreiniging.

Inhoud

1	Inleiding.....	1
1.1	Achtergrond.....	1
1.2	De doelstelling.....	1
1.3	Leeswijzer.....	3
2	Onderzoeksopzet.....	4
2.1	De toegepaste geofysische methoden.....	4
2.2	Het uitgevoerde onderzoek.....	4
3	Geologie en hydrogeologie	8
3.1	Globale geologie van het onderzoeksgebied.....	8
3.2	Geologie van de ondiepe ondergrond (bovenste tientallen meters)	9
3.3	Beschikbare boorgegevens nabij de onderzoekslocatie	9
3.4	Informatie betreffende grondwaterstanden uit peilbuizen.....	14
4	Georadar	17
4.1	De georadar methode.....	17
4.2	Uitgevoerd veldonderzoek	18
4.3	Interpretatie en resultaten.....	18
4.4	Conclusies georadar onderzoek.....	29
5	HRS (P-golven)	30
5.1	De HRS methode	30
5.2	Het uitgevoerde HRS onderzoek.....	31
5.3	Interpretatie en resultaten.....	31
5.4	Conclusies HRS onderzoek.....	36
6	SRS (S-golven)	37
6.1	De SRS methode	37
6.2	Het uitgevoerde SRS onderzoek.....	37
6.3	Interpretatie en resultaten.....	38
6.4	Conclusie SRS onderzoek.....	38
7	Complementair geofysisch onderzoek voor een gedetailleerde bodemverkenning van een DNAPL locatie	40
7.1	Evaluatie van de toegepaste methodiek.....	40
7.2	Een aanzet tot een protocol.....	41



8	Conclusies en aanbevelingen.....	43
9	Dankbetuiging.....	44
10	Verwijzingen.....	45

Lijst van figuren

Fig. 1.1:	De ligging van het onderzoeksgebied bij Austerlitz.	2
Fig. 2.1:	Locatiekaart van de geofysische profielen en CMP metingen in het onderzoeksgebied bij Austerlitz.	6
Fig. 3.1:	Locatie van boringen in de omgeving van het onderzoeksge- bied bij Austerlitz.....	10
Fig. 3.2:	Locatie van peilbuizen in de omgeving van de georadarpro- fielen bij Austerlitz.....	12
Fig. 3.3:	Geologische profielen door enkele diepe boringen rond de DNAPL locatie bij Austerlitz.....	16
Fig. 4.1:	Radarsectie langs een westelijk tracé van profiel 7 met fluvioglaciale (sandr) radar faciës; (a) AGC versterking, (b) SEC versterking	20
Fig. 4.2:	De overgang van subhorizontale reflecties in fluvioglaciale afzettingen (sandr) naar scheefgestelde reflecties in gestuw- de afzettingen; (a) AGC versterking, (b) SEC versterking.	24
Fig. 4.3:	Anticlinale structuur in reflectiepatroon van gestuwde afzet- tingen; (a) AGC versterking, (b) SEC versterking.	25
Fig. 4.4:	Chaotische reflectiepatronen van gestuwde afzettingen; (a) AGC versterking, (b) SEC versterking.	26
Fig. 4.5:	Drie georadarsecties in de directe omgeving van de veront- reinigingsbron.....	28
Fig. 5.1:	HRS (P-golven) sectie langs het westelijk deel van profiel 7 te Austerlitz.	33
Fig. 5.2:	De uit HRS (P-golven) en boringen afgeleide schematische opbouw van de ondergrond in de directe omgeving van de DNAPL locatie te Austerlitz.	35
Fig. 6.1:	SRS (S-golven) sectie langs het westelijk deel van profiel 7 te Austerlitz.	39
Fig. 7.1:	Protocol toepassing geofysica voor ondergrondkarakterisatie.	42

Lijst van tabellen

Tabel 2.1:	De data waarop de geofysische metingen te Austerlitz zijn verricht.....	7
Tabel 3.1:	Geologische Formaties in het onderzoeksgebied volgens Zagwijn en van Staalduinen (1975) en REGIS Database (1997).....	8
Tabel 3.2:	De boringen in en nabij het onderzoeksgebied.....	9
Tabel 3.3:	Stratigrafie afgeleid uit enkele boringen in het onderzoeksgebied.	11
Tabel 3.4:	Globaal overzicht van de lithologie aangetroffen in de boringen bij het onderzoeksgebied.....	13
Tabel 3.5:	Lithologie aangetroffen in de peilbuizen gemaakt in 1996.	13
Tabel 3.6:	Overzicht van de in de boringen aangetroffen ondiepe klei-voorkomens	14
Tabel 3.7:	Grondwaterstanden gepeild in waarnemingsputten.	15
Tabel 4.1:	Profiellengte en de CMP locaties van de georadar metingen langs profiellijnen 2 en 7 te Austerlitz.	18
Tabel 4.2:	Grondwaterstanden afgeleid uit de georadarmetingen en gepeild in waarnemingsputten langs profiel 2.	22
Tabel 5.1:	Informatie over de uitgevoerde seismische meting P-HRS te Austerlitz.	31
Tabel 6.1:	Informatie over de uitgevoerde seismische meting P-HRS te Austerlitz.	38

Lijst van bijlagen

- Bijlage 1: De geofysische exploratiemethoden toegepast te Austerlitz; theorie en praktijk
- Bijlage 2: Georadarsectie 7 (westelijk deel); (a) 100 MHz, (b) 50 MHz
- Bijlage 3: Georadarsectie 2; (a) 100 MHz, (b) 50 MHz
- Bijlage 4: Geïntegreerde sectie langs profiel 7 met georadarsectie (boven) en HRS sectie (onder).

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

In een gebied rondom de Oude Postweg te Austerlitz op de Utrechtse heuvelrug (Fig. 1.1) zijn metingen met verschillende geofysische exploratiemethoden uitgevoerd. Dit geofysisch onderzoek is een onderdeel van het DNAPLKAR project dat uitgevoerd wordt door een consortium van NITG-TNO en 'Oranjewoud' in opdracht van de Stichting NOBIS. Doelstelling van DNAPLKAR is het ontwikkelen van een karakterisatiemethodiek voor met 'Dense Non-aqueous Phase Liquids' (DNAPL's) verontreinigde locaties, gericht op in-situ sanering. Een onderdeel van deze karakterisatiemethodiek is de identificatie van geologische 'traps', die gevormd worden door slecht doorlatende leem- of kleilagen en waarin zich mogelijk verontreinigende organische stoffen concentreren. DNAPL's zijn stoffen met een hoger soortelijk gewicht dan water (o.a. trichlooretheen: $1,46 \text{ g/cm}^3$), die door het grondwater heen naar beneden zakken en de ondergrond tot op grote diepte kunnen verontreinigen. Slecht doorlatende lagen kunnen de verdere migratie stoppen. In traps en op subhorizontale slecht doorlatende lagen met enige laterale verbreiding en dikte, vormen de DNAPL's poelen van "puur product" of zinklagen. Daarnaast zal een (klein) deel van deze organische stoffen (ordegrootte enkele mg/l) langzaam oplossen in het grondwater en zich daarmee verbreiden in de stromingsrichting van het grondwater.

Op de onderzochte locatie aan de Oude Postweg te Austerlitz in de gemeente Zeist zijn DNAPL's in de bodem gelect. Deze verontreiniging is aangetoond middels bodemonderzoek aan de hand van boringen en analyses van grond- en grondwatermonsters (Intron-Bodemtech, 1994, Iwaco, 1997). Op deze locatie is in de periode van 1968 tot 1980 een metaal- en moffelbedrijf gevestigd geweest. Historisch onderzoek heeft uitgewezen dat voor het ontvetten van de metalen, een trichlooretheen-bad ('tri') aanwezig is geweest dat vermoedelijk periodiek is gelegegd in een bezinkput.

1.2 De doelstelling

Het doel van het geofysisch onderzoek is de ondergrond van het gebied op en rond de verontreinigde locatie middels niet-destructieve technieken gedetailleerd in kaart te brengen en te karakteriseren. Dit om geologische structuren, gevormd door slecht doorlatende leem- of kleilagen (traps), waarop puur product aanwezig kan zijn te identificeren.

Verskillende geofysische exploratiemethoden zijn complementair gebruikt om deze doelstelling te verwezenlijken. De methoden zijn georadar, hoge resolutie reflectieseismiek (HRS) en S-golven reflectieseismiek (SRS).

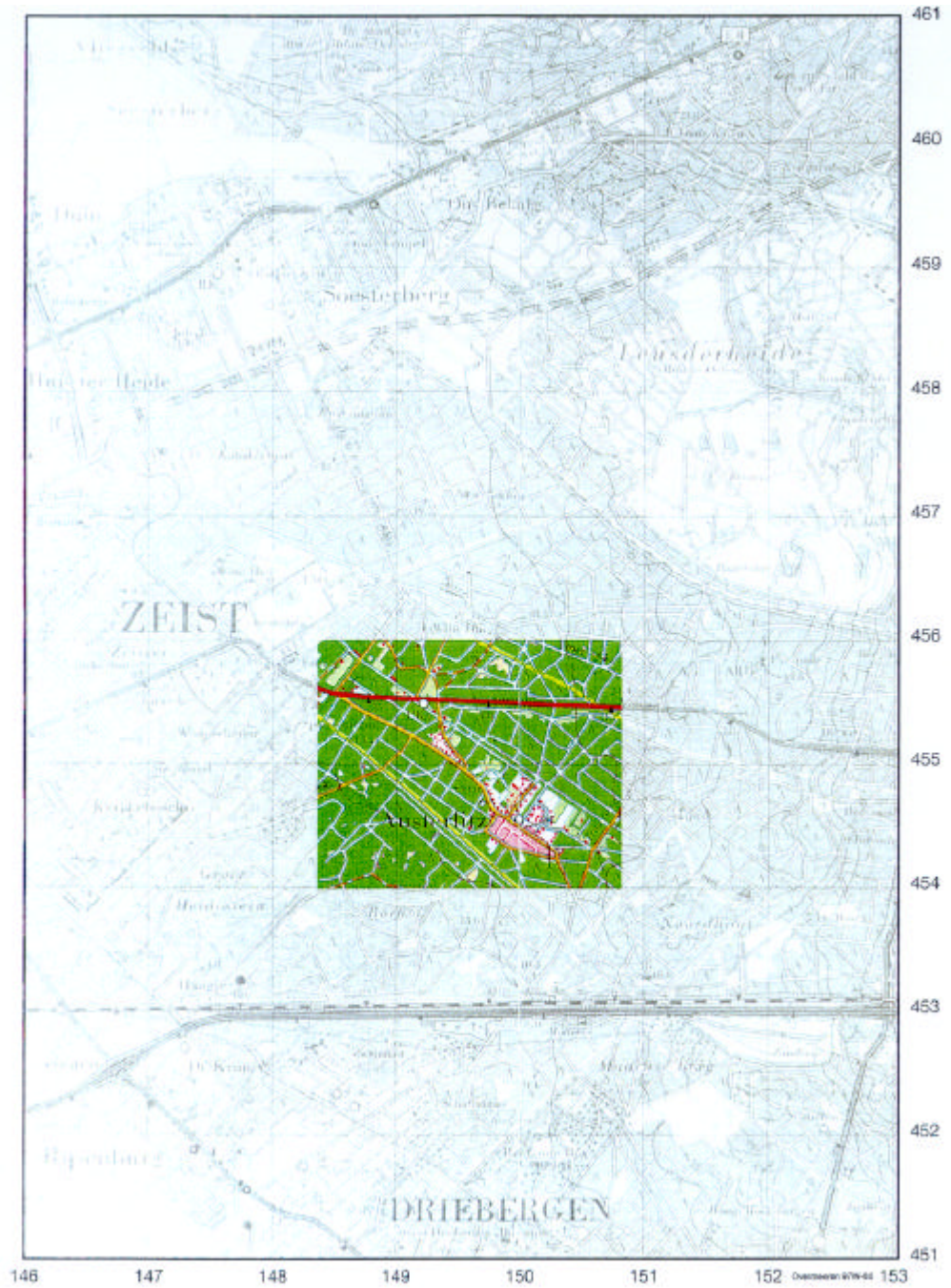


Fig. 1.1: De ligging van het onderzoeksgebied bij Austerlitz.

1.3 Leeswijzer

De theorie en achtergrond van de geofysische methoden worden uitgebreid toegelicht in Bijlage 1. Hierin zijn ook het in Austerlitz uitgevoerde veldwerk en de toepaste bewerking van de metingen gedetailleerd beschreven. De resultaten van de geofysische metingen worden gepresenteerd in hoofdstukken 4 (georadar), 5 (HRS) en 6 (SRS). Hieraan voorafgaand worden in hoofdstuk 3 de onderzoeksopzet met de drie geselecteerde geofysische technieken en het uitgevoerde veldwerk met de locatie van de meetlijnen toegelicht. In hoofdstuk 2 worden de geologie en hydrogeologie van het onderzochte gebied beschreven. In hoofdstuk 7 wordt de geïntegreerde toepassing van de verschillende geofysische technieken geëvalueerd en wordt op basis daarvan een aanzet gegeven tot een protocol voor soortgelijk onderzoek op andere locaties.

2 Onderzoeksopzet

2.1 De toegepaste geofysische methoden

De te Austerlitz toegepaste geofysische exploratiemethoden zijn georadar ('*Ground Penetrating Radar*' of GPR), hoge resolutie reflectie seismiek (HRS) met P-golven en hoge resolutie reflectie seismiek met S-golven (SRS). Deze methoden zijn alle drie gebaseerd op de voortplanting van golven in de bodem. Georadar en HRS zijn complementair in het dieptebereik. Georadar dringt relatief weinig door in de bodem (maximaal 40 m), zodat hiermee de meest ondiepe informatie wordt verkregen, terwijl HRS in deze zone minder goed toepasbaar is en juist over de diepere ondergrond (vanaf ongeveer 25 m) informatie verschaft. Omdat tijdens het veldonderzoek bleek dat georadar in het onderzoeksgebied minder diep dan verwacht doordrong (ongeveer 10 m: zie hoofdstuk 4) is een relatief nieuwe seismische techniek, S-golven reflectie seismiek of SRS ingezet om te trachten het ontstane hiaat in het dieptebereik op te vullen. Het gebruik van P-golven voor verkenning van de ondiepe ondergrond vindt reeds algemene ingang. Het gebruik van S-golven is echter nauwelijks van de grond gekomen door gebrek aan een goede bron voor het opwekken van S-golven. Recentelijk is een nieuwe S-bron beschikbaar gekomen (schuifgolf vibrator van de firma OYO-CAG). S-golven bieden het voordeel dat informatie vanaf ongeveer 5-10 m diepte kan worden verkregen en dat ze ongevoelig zijn voor vloeistoffen en dat derhalve de grondwaterspiegel geen storende invloed op de golfvoortplanting heeft.

De hier toegepaste geofysische methoden zijn alle hoge resolutie technieken, waarmee praktisch continue secties van de ondergrond worden verkregen, zodat de structurele opbouw van de bodem wordt afgebeeld; dit is met punt- of lijnmetingen zoals boringen in de praktijk niet mogelijk. De geofysische profielen maken het mogelijk de locaties van verkenningsboringen en sonderingen zeer gericht te selecteren en het noodzakelijke aantal boringen te beperken, hetgeen een belangrijke kostenbesparing kan betekenen. Daarnaast bieden geofysische technieken het voordeel dat ze niet-destructief zijn, zodat eventueel aanwezige slecht doorlatende lagen onaangetast blijven.

2.2 Het uitgevoerde onderzoek

Georadarmetingen zijn verricht langs 13 profiellijnen met een totale lengte van ongeveer 9,5 km. Op grond van de resultaten hiervan is profiellijn 7 geselecteerd voor de uitvoering van complementair seismisch onderzoek. Vanwege het feit dat de georadargegevens slechts een penetratie van ongeveer 10 m toonden, is besloten om in plaats van de oorspronkelijk geplande twee P-golf lijnen van elk 500 m lengte, langs één tracé van 500 m seismische metingen met zowel P-golven als S-golven op te nemen. Op de locatiekaart in Fig. 2.1 is aangegeven waar de geofysische metingen zijn verricht. In tabel 2.1 zijn de data vermeld waarop het veldonderzoek is uitgevoerd. Meer gedetailleerde informatie over de profiellijnen wordt gegeven in



Bijlage 1 bij de betreffende techniek.



Fig. 2.1: Locatiekaart van de geofysische profielen en CMP metingen in het onderzoeksgebied bij Austerlitz.

Tabel 2.1: De data waarop de geofysische metingen te Austerlitz zijn verricht

methode	datum
georadar (GPR)	26-28 mei 1997
P-golven reflectie seismiek (HRS)	1-4 juli 1997
S-golven reflectie seismiek (SRS)	25-27 juni 1997

3 Geologie en hydrogeologie

3.1 Globale geologie van het onderzoeksgebied

In de bovenste honderden meters van het onderzoeksgebied zijn op basis van regionale gegevens (Zagwijn en van Staalduinen, 1975 en REGIS Database, 1997) de formaties aanwezig zoals aangegeven in tabel 3.1. De aangegeven dieptes zijn niet nauwkeurig, aangezien ze gedeeltelijk zijn gebaseerd op extrapolatie van een profiel opgenomen in de geologische kaart van Nederland (Zagwijn en van Staalduinen, 1975).

Tabel 3.1: *Geologische Formaties in het onderzoeksgebied volgens Zagwijn en van Staalduinen (1975) en REGIS Database (1997).*

Naam	Ouderdom	Afzettings- milieu	Veron- der- stelde diepte West (m-mv)	Veron- der- stelde diepte Oost (m-mv)	Lithologie
Drente	Boven en Midden Pleistoceen	locale herkomst	0-22	0-24	op locatie: smeltwater- afzetting - overwegend grove grindhoudende zanden
Urk	Midden Pleistoceen	grote rivieren (Rijn)	-	24-33	grove zanden, soms met grind, op een bepaald niveau ook dikke veen- en kleila- gen
Sterksel	Midden Pleistoceen	grote rivieren (Rijn en Maas)	22-30	33-48	grove zanden en grin- den met slechts zeer plaatselijk kleilagen
Kedichem	Onder Pleistoceen	grote rivieren (Rijn en Maas)	30-42	-	overwegend fijne zanden en kleien
Harderwijk	Onder Pleistoceen	grote rivieren	42-93	48-100	overwegen grove zanden met zeer fijn grind
Tegelen	Onder Pleistoceen	Grote rivie- ren (Rijn en Maas)	93-105	100-127	voornamelijk kleien en grinden, maar ook zanden
Maassluis	Onder Pleistoceen	Marien	105-156	127-178	zanden (schelphou- dend) met ingescha- kelde kleilichamen
Oosterhout	Pliocene	Marien	156-?	178-?	schelphoudende zanden en kleien
Breda	Mioceen	Marien			zanden, zandige kleien en kleien

De regionale gegevens geven aan dat er grote laterale variaties in de formaties verwacht mogen worden. Op het geologisch profiel is een breuk aangegeven nabij de onderzoekslocatie. Deze breuk heeft een richting NW-ZO en is een verlengde van het peelandbreuksysteem (Zagwijn en van Staalduinen, 1975). De invloedssfeer van de breuk reikt tot ongeveer 25 m-mv. Ten westen en oosten van de breuk gelden verschillende formaties en dieptes.

De diepte van de basis van het Tertiair ligt op ongeveer 750 m.

3.2 Geologie van de ondiepe ondergrond (bovenste tientallen meters)

Het bovenste gedeelte van de ondergrond is een sandr of spoelzandwaaier (Riezebos en Augustinus, 1965). Dit is in tegenstelling tot wat oorspronkelijk werd aangenomen (DNAPLKAR basisprojectplan, 1997). Een sandr is een uit fluvio-glaciaal materiaal bestaand sediment dat is afgezet door een snel stromende, verwilderde rivier tijdens een maximale uitbreiding van het landijs. Dit moet derhalve in het Saalien zijn geweest (circa 150 000 jaar geleden). Riezebos en Augustinus (1965) demonstreren dat in een naburige sandr (Soesterberg) het sediment is aangevoerd met hoge stroomsnelheid, waarbij nagenoeg horizontale, parallel-gelaagde strata worden afgewisseld met geulen die lateraal zijn opgevuld. Locale verstoringen komen voor, maar spelen in het geheel slechts een ondergeschikte rol.

3.3 Beschikbare boorgegevens nabij de onderzoekslocatie

De gegevens van de boringen in de nabijheid van de onderzoekslocatie (Fig. 3.1) zijn samengevat in tabel 3.2.

Tabel 3.2: De boringen in en nabij het onderzoeksgebied

boring	locatie	jaar	diepte (m)	hoogte (m+NAP)	x	y	lithologie	stratigrafie	REGIS gdsI.**	geofys. bgm.***
32C-99	Austerlitz	1891	21	15,9	149 200	455 300	+			
32C-100	Zeist		130	8,0	147 900	455 200	+		+	
32C-101	Austerlitz		53	7,5	148 100	454 300				
32C-156	Austerlitz	1834	135	16,1	149 985	455 887	+	+		
32C-213	Zeist	1968	86,5	14,0	148 880	456 260	+			
32C-229*	Driebergen	1972	203	6,5	149 550	452 490	+	voorlopig		+
32C-241	Zeist	1973	78,0	13,5	148 700	456 390	+			
32C-365	Austerlitz	1939	47,5	8,0	148 610	454 680	+	+		
32D-114	Zeist	1966	199,5	14,5	150 200	454 800	+	+	+	

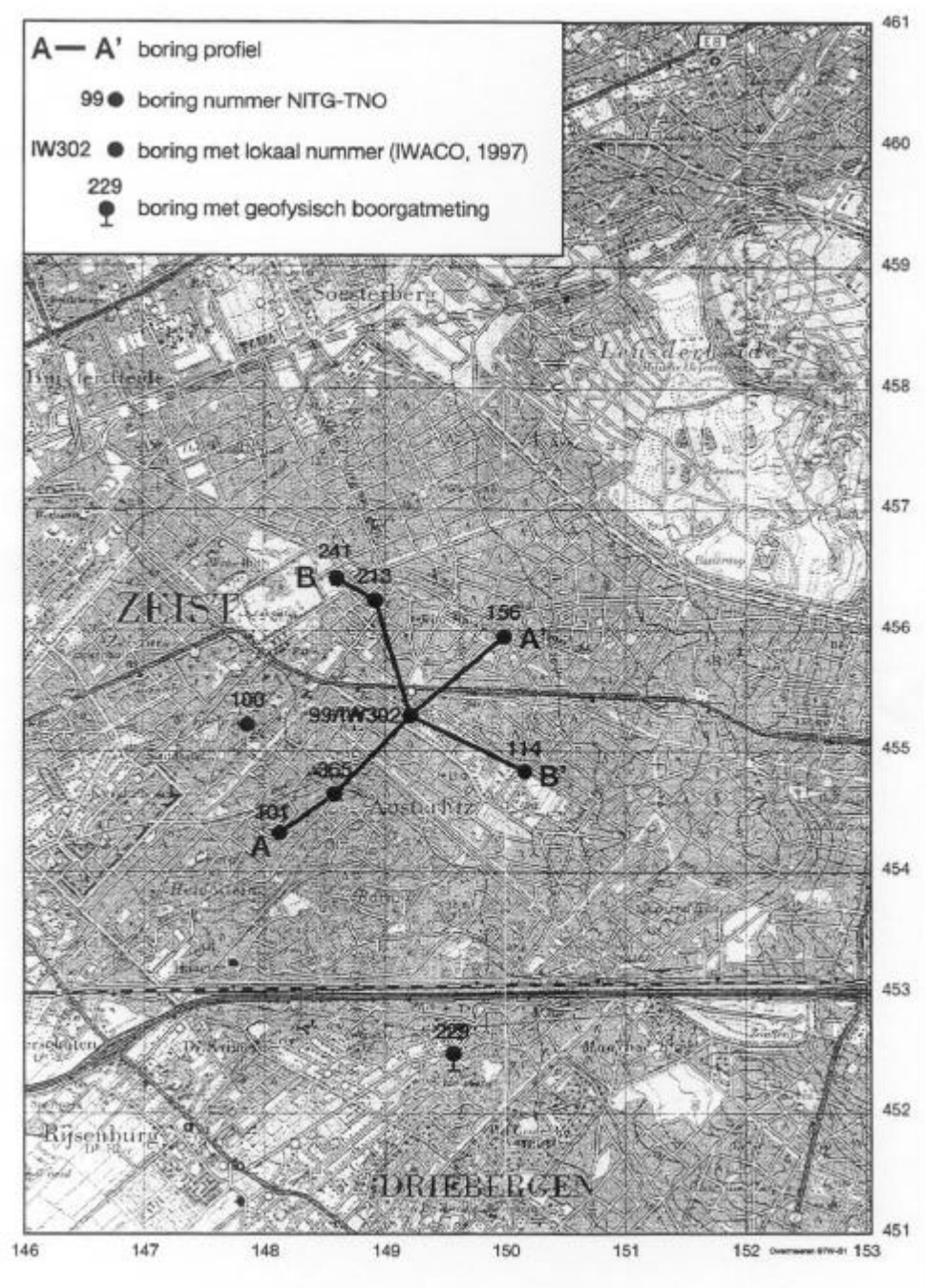
* ongeveer 2800 m ten zuiden van de seismische lijn

** gidslaag

*** geofysische boorgatmeting

Voor het vaststellen van de omvang van de verontreiniging op de onderzoekslocatie zijn in 1996 door Iwaco een aantal peilbuizen geplaatst (Iwaco, 1997). De boringen, die alle in de omgeving van de radarprofielen liggen, staan met lokale nummers (301-302, 401-406 en 501-503) aangegeven op de locatiekaart van Fig. 3.2. Peilbuizen 301 en 302 hebben een diepte van respectievelijk 48 en 116 m. De overige boringen hebben dieptes van ca. 11 m.

Fig. 3.1: Locatie van boringen in de omgeving van het onderzoeksgebied bij



Austerlitz

Twee exploratieboringen b1 en b2, met dieptes van respectievelijk 30 m en 18 m zijn uitgevoerd met de spoelmachine voor het boren van de schotgaten; deze staan eveneens aangegeven op de locatiekaart in Fig. 3.2. Aanvankelijk was het de bedoeling in deze gaten boorgatmetingen uit te voeren. De gaten bleken echter niet voldoende stabiel om de logging sondes in neer te laten.

Stratigrafie en lithologie

De stratigrafische opbouw van het onderzoeksgebied is afgeleid uit analyse van boringen 32C-156 (NITG-TNO District West) en 32D-114 (Tabel 3.3). Hierbij zij opgemerkt dat deze beschrijving enigszins tegenstrijdig is met de gegevens in OLGA (On-Line Grondwater Archief, NITG-TNO). De dieptes van de formaties wijken in de bovenste 50 m (tot de Kedichem Formatie) af.

Tabel 3.3: Stratigrafie afgeleid uit enkele boringen in het onderzoeksgebied.

Formatie	Kenmerken	Herkomst	32C-156	32D-114
Drente	grove hellingafzettingen (sandr)		0-33	0-30
Urk	grauwe/gele klei (niet gestuwd)		33-42	30-38
Sterksel	zanden (geelachtig), kwarts	oostelijke rivieren	42-55	38-52
Kedichem	veel klei en fijn zand; plantenresten		55-71	52-64
Harderwijk	kwartzanden	oostelijke rivieren	71-100	64-97
Harderwijk		zuidelijke invloed	100-107	97-107
Tegelen	meer klei, vuurstenen, grind, knollen		100-(135)	107-133
Maassluis	schelprijk zand	kustnabij marien, delta;		133-(199?)

De lithologische gegevens van de beschikbare boringen betreffende de ondiepe ondergrond tot 30 m-mv en de slecht doorlatende lagen (klei, leem) zijn samengevat in tabel 3.4. De lithologische gegevens van de diepere locale peilbuizen 301 en 302 zijn vermeld in tabel 3.5. In de overige peilbuizen is tot de einddiepte van ca. 11 m uitsluitend zand aangetroffen.

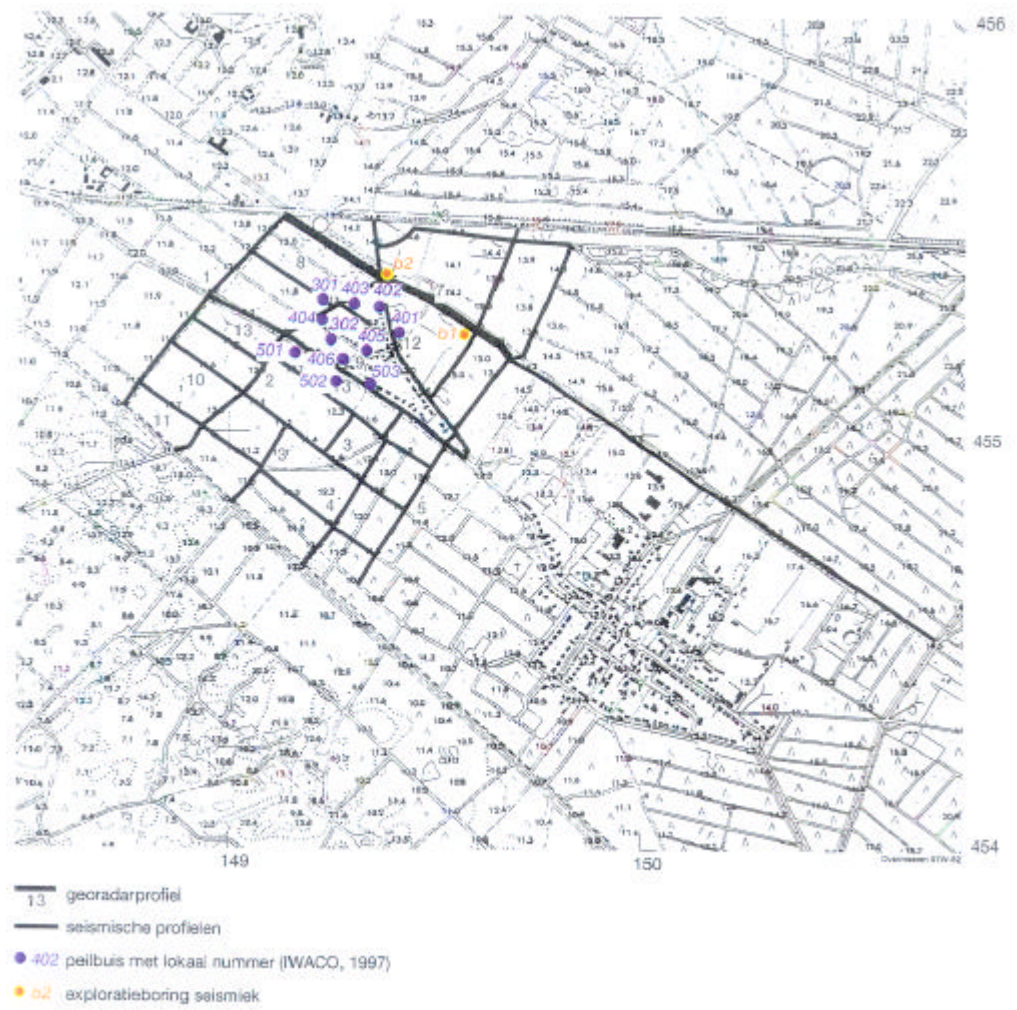


Fig. 3.2: Locatie van peilbuizen in de omgeving van de georadarprofielen bij Austerlitz

Tabel 3.4: Globaal overzicht van de lithologie aangetroffen in de boringen bij het onderzoeksgebied

boring	diepte (m)	zandige afzettingen		slecht doorlatende afzettingen diepte (m-mv)
		diepte (m-mv)	korrelgrootte	
32C-99	21	0-21	grof	-
32C-100	130	0-13 13-22 22-29	grof matig grof grof	41-43 89-102
32C-101	53	0-4 4-6 6-21	matig grof grof matig grof	36,5-40
32C-156	135	0-20 20-23	matig grof fijn	45-45,5 55,5-66
32C-213	86,5	0-30	matig grof	-
32C-229	203	0-22	grof	30-33 36,5-41,5 57,5-60,5 95-98
32C-241	78,0	0-30	matig grof	34-36,5
32C-365	47,5	0-47	grof	47-47,5
32D-114	199,5	0-38	matig grof-grof	38-40,5 118,5-123,5

Tabel 3.5: Lithologie aangetroffen in de peilbuizen gemaakt in 1996.

peilbuis 1996	diepte (m)	zandige afzettingen		slecht doorlatende afzettingen diepte (m-mv)
		diepte (m-mv)	korrelgrootte	
301	48,5	0-27,3 27,3-28,7 28,7-30	zeer grof grind zeer grof	-
302	116,5	0-34	zeer grof	49,5-51 80,4-81

Het materiaal dat uit de twee verkenningsboringen b1 en b2 langs de seismische profiellijn naar boven kwam betrof, voor zover na te gaan, alleen (grof tot zeer grof) zand. Ook in de 65 boringen voor de schotgaten langs het seismische profiel is in de monsters uitsluitend zand en grind aangetroffen.

Ondiepe kleivoorkomens

Voor de migratie van DNAPL's zijn dunne (enkele centimeters dikte) kleilagen van belang. Op een dergelijke laag vindt een horizontale verbreiding plaats van het materiaal eventueel tot aan een locatie waar de DNAPL verder kan zakken onder invloed van de zwaartekracht. Voor scheefgestelde (klei)lagen geldt dat deze vaak de onderkant van een stroombaan van de DNAPL's vormen. De ondiepste kleilaag die in de boorgaten in de omgeving is aangetroffen bevindt zich in de verschillende boorgaten op verschillende dieptes. In tabel 3.6 zijn deze kleivoorkomens nog eens samen met hun stratigrafische indeling samengevat. In de tabel zijn de afstanden tot de seismische lijn aangegeven.

Tabel 3.6: Overzicht van de in de boringen aangetroffen ondiepe kleivoorkomens

boring	diepte boring (m)	afstand tot seismische lijn (m)	diepte slecht doorlatende afzettingen		vermoedelijke stratigrafie
			(m-mv)	(m-NAP)	
32C-99	21	200 (ZW)	-	-	-
32C-100	130	1625 (W)	32 41-43	24 32	Sterksel Kedichem
32C-101	53	1750 (ZW)	36,5-40	25	grens Sterksel- Kedichem
32C-156	135	650 (NO)	45-45,5 55,5-66	29 40	Sterksel Kedichem
32C-213	86,5	1000 (NW)	-	-	-
32C-241	78,0	1150 (NW)	34-36,5	20	Sterksel
32C-365	47,5	1150 (ZW)	47-47,5	39	Kedichem
32D-114	199,5	650 (OZO)	38-40,5	24	Sterksel
IW-302	116,5	170 (ZW)	49,5-51 80,4-81	37 67	Kedichem Harderwijk

Bovenstaande informatie suggereert het volgende:

- Het is onwaarschijnlijk dat in de Drente Formatie kleilagen voorkomen (dit zijn sedimenten die zijn afgezet tijdens de Saalien ijstijd van ongeveer 150.000 tot 120.000 jaar geleden). Dit betreft dieptes tot ongeveer 20 à 25 m-mv.
- In de daaronder liggende Urk en/of Sterksel Formatie komen wel kleilichamen voor. Het zijn sedimenten aangevoerd door de Rijn (Urk) en de Rijn en de Maas (Sterksel) gevormd tijdens het 'Cromerien Complex', een afwisseling van warme en koude tijden in het Midden Pleistoceen (0.8 - 0.3 M jaar geleden (Sterksel)), en Urk ook tijdens Elsterien, Holsterien en Saalien (ongeveer 0.5 - 0.17 M jaar geleden). Dit betreft dieptes vanaf 20-25 m tot ongeveer 40-45 m. Mogelijke kleilichamen in deze formatie zijn het belangrijkste voor het onderhavige project. Vergelijking van boring 32C-241 (met klei) en 32C-213 (zonder klei), op een onderlinge afstand van slechts 222 m, geeft aan dat de aanwezigheid van klei over korte afstand kan variëren.
- Ook de daaronderliggende Formatie van Kedichem (Onder Pleistoceen) heeft vaak kleilichamen.

Fig. 3.3 toont 2 geologische profielen door enkele diepe boringen. In de boorkolommen zijn kleilagen aangegeven, welke van belang zijn voor de interpretatie van de seismische sectie en voor de verticale migratie van DNAPL's. De ligging van de profielen is aangegeven op de kaart van Fig. 3.1.

3.4 Informatie betreffende grondwaterstanden uit peilbuizen

Tijdens de uitvoering van de georadarmetingen zijn in enkele putten de grondwaterstanden gemeten. Tabel 3.7 geeft een overzicht.

Tabel 3.7: Grondwaterstanden gepeild in waarnemingsputten.

waarnemingsput	filterdiepte (m-mv)	peildatum	diepte grondwaterspiegel (m-mv)
301	47-48	26 mei 1997	9,60
301A	27,7-28,7	26 mei 1997	9,60
403	10-11	26 mei 1997	10,00
32D-114	30-31	28 mei 1997	10,9

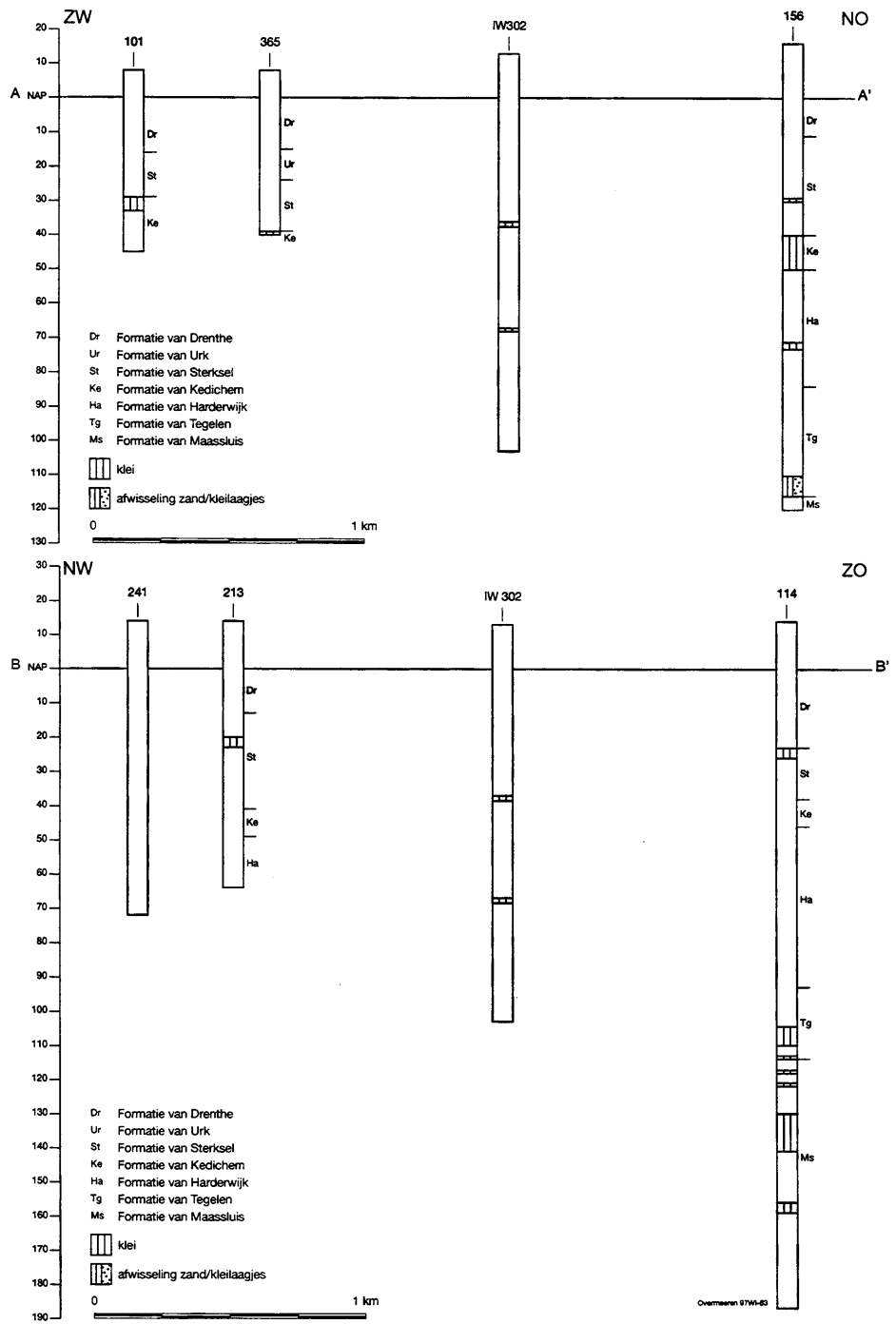


Fig. 3.3: Geologische profielen door enkele diepe boringen rond de DNAPL locatie bij Austerlitz

4 Georadar

4.1 De georadar methode

De georadarmethode is gebaseerd op de voortplanting van de elektromagnetische golven in de bodem. Via een zender en zendantenne worden radargolven de bodem in gezonden. Op grensvlakken tussen (aard)lagen met contrasterende elektrische eigenschappen wordt de golfenergie gereflecteerd en aan het oppervlak door een ontvangantenne opgevangen. De reflecties worden afgebeeld in radar(echo)-grammen, waarin op elke meetpositie langs een spoor de binnengekomen reflecties tegen de reistijd worden weergegeven. Voor de kartering van de ondergrond worden langs profiellijnen metingen gemaakt met een geringe onderlinge afstand van 0,25 tot maximaal 1 m (afhankelijk van de antenne-frequentie). Dergelijke georadar secties geven een praktisch continu 2D beeld van de ondergrond.

De mate van reflectie wordt bepaald door het contrast in de diëlektrische constante (ϵ_r) tussen verschillende aardlagen. De diëlektrische constante wordt voor een groot deel bepaald door het volumetrisch watergehalte in de bodem. De grondwaterspiegel geeft dan ook vaak een sterke reflectie. Ook veen en klei onderscheiden zich dank zij een hoog watergehalte vaak duidelijk van zanden. Echter, onder de grondwaterspiegel is er lang niet altijd een significant contrast tussen kleien en waterverzadigde zanden.

In de onverzadigde zone kunnen ook binnen zandformaties laaggrenzen en sedimentaire structuren (zwakke) reflecties geven. Dit komt omdat het vochtgehalte van zandige afzettingen afhangt van de porositeit en dus en varieert met de korrelgrootte en korrelgrootteverdeling. Onder de grondwaterspiegel echter zijn de verschillen veel kleiner en is het daarom moeilijker om interne reflecties waar te nemen.

Georadar richt zich op een verkenning van de geologische opbouw van de ondergrond en gebruikt antennes met relatief lage frequenties tussen 25 en 200 MHz om zo diep mogelijk in de bodem door te dringen. De maximale exploratiediepte die met georadar bereikt kan worden wordt grotendeels bepaald door de elektrische eigenschappen van de bodem. Hoe hoger de elektrische geleiding of conductiviteit, des te geringer is de doordringingsdiepte. In de praktijk is georadar ongeschikt voor gebruik in gebieden waar de conductiviteit van de bodem groter is dan 10 mS/m. In een bodem met een lage conductiviteit hangt de doordringingsdiepte af van de frequentie van de radargolven; hoe lager de frequentie, des te groter het doordringingsvermogen. De toename in de exploratiediepte gaat echter ten koste van een vermindering van het scheidend vermogen (de resolutie).

In een gemeten georadarsectie worden de reflecties tegen de reistijd afgebeeld. Voor de kartering van de ondergrond is echter niet de tijd, maar de diepte van een reflector van belang. De tijd kan in diepte worden omgezet via de voortplantingssnelheid van de radargolven.

De gemiddelde voortplantingssnelheid tot op een bepaalde reflectie kan in het veld bepaald worden door "common midpoint" (CMP) metingen uit te voeren.

Georadar onderzoek omvat drie delen:

1. de data acquisitie
2. de data bewerking
3. de interpretatie van de gegevens.

Een uitgebreidere beschrijving van de principes en achtergronden van georadar alsook van de te Austerlitz uitgevoerde data acquisitie en data bewerking wordt gegeven in Bijlage 1. Hieronder wordt in het kort de ligging van de gemeten profielen omschreven. Daarna worden de interpretatie en de resultaten daarvan uitvoerig besproken.

4.2 Uitgevoerd veldonderzoek

De georadarmetingen zijn uitgevoerd langs in totaal 13 profiellijnen. Omdat het type waargenomen reflectiepatronen langs alle profielen hetzelfde is, zijn twee karakteristieke secties geselecteerd langs loodrecht op elkaar staande profiellijnen voor de hieronder volgende beschrijving van de opbouw van de ondergrond. Dit zijn de secties langs het westelijk deel van profiel 7 en langs profiel 2 met frequenties van 100 en 50 MHz (Tabel 4.1).

Tabel 4.1: *Profiellengte en de CMP locaties van de georadar metingen langs profiellijnen 2 en 7 te Austerlitz.*

Austerlitz mei 1997	lengte (m)			CMP 100 MHz	
	50 MHz	100 MHz	200 MHz	locatie	nr.
profiel 2	655	662		#551	1
profiel 7	622,5	1835,5			

4.3 Interpretatie en resultaten

De bewerkte secties langs profiellijnen 7 en 2 zijn afgebeeld in Bijlagen 2 en 3. Nadat eerst het regionale reflectiepatroon aan de hand van deze twee geselecteerde secties is beschreven, wordt vervolgens via drie korte radarsecties in de directe omgeving van de DNAPL bron langs de Oude Postweg de situatie ter plaatse in meer detail bekeken.

4.3.1 Beschrijving van het regionale reflectiepatroon

Profiel 7 (Bijlage 2)

Profiel 7 is een NW-ZO lopend profiel (Fig. 2.1); op afstand 277 m snijdt het profiel de Oude Postweg op een 5-sprong. Georadarmetingen zijn langs dit profiel uitgevoerd met 100 en 50 MHz antennes. In bijlage 2 is het westelijk deel van deze sectie (620 m tussen profiel 1 en profiel 5), waarlangs ook de seismische opnamen zijn gemaakt, afgebeeld. De 100 MHz sectie (Bijlage 2a) toont het grootste detail;

Fig. 4.1 toont een karakteristiek deel van dit tracé.

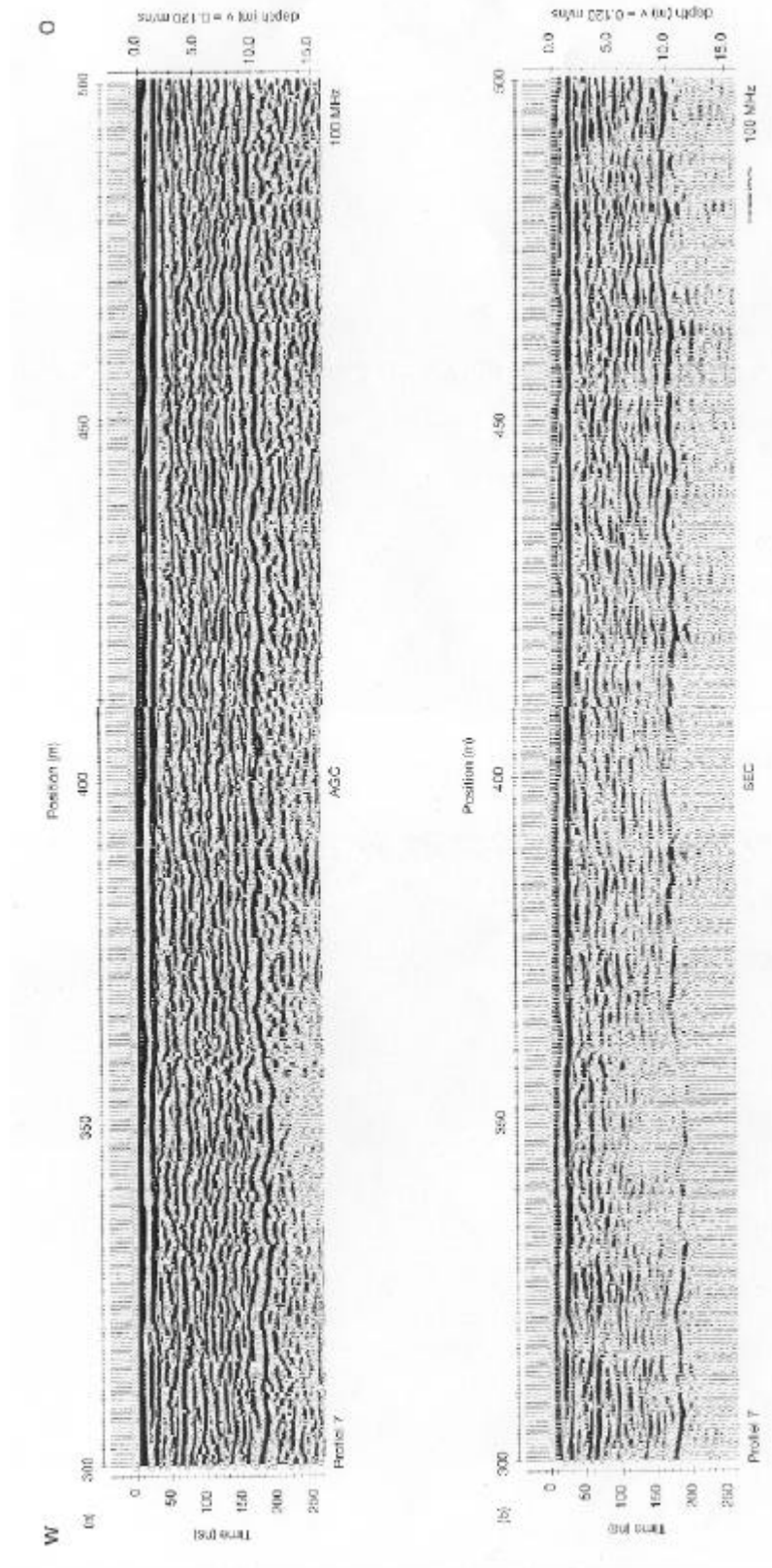


Fig. 4.1: Radarsectie langs een westelijk tracé van profiel 7 met fluvio-glaciale (sandr) radar faciës; (a) AGC versterking, (b) SEC versterking

In de met AGC versterking bewerkte sectie (Fig. 4.1a) overheersen subhorizontale en golvende reflecties met een beperkte continuïteit. In de met SEC versterking bewerkte sectie (Fig. 4.1b) blijkt dat de amplitude van deze reflecties zwak is. Dit reflectiepatroon van de sandr contrasteert duidelijk met de reflectie van de grondwaterspiegel, die overal langs de profielen in het onderzoeksgebied Austerlitz wordt geregistreerd en wordt gekenmerkt door een grote amplitude, grote continuïteit en een negatieve polariteit. Ook langs profiel 7 is de reflectie van de grondwaterspiegel, op een looptijd van ongeveer 160 ns, langs het gehele profiel zichtbaar. De 50 MHz sectie (Bijlage 2b) heeft de grootste doordringing (ca. 350 ns). Aannemende dat onder de grondwaterspiegel de voortplantingssnelheid van de radargolven ongeveer 6 cm/ns zal bedragen, betekent dit dat de maximale doordringingsdiepte van de 50 MHz golven ongeveer 15 m is. De storende diffractie-hyperbolen in het westelijke deel van de sectie geven een snelheid van ongeveer 12 cm/ns, waaruit kan worden afgeleid dat de bron van de diffractie zich onder het aardoppervlak bevindt. Onder de grondwaterspiegelreflectie wordt op ruim 300 ns een min of meer continue horizontale reflectie waargenomen. De congruente vorm van deze reflectie met die van de grondwaterspiegel en de dubbele looptijd geven aan dat dit een meervoudige reflectie ('multiple') van de grondwaterspiegel en dus geen daaronder liggend (lithologisch) grensvlak is. Het grootste deel van de reflecties onder de grondwaterspiegel vertegenwoordigt ruis. Continue reflecties met relatief grote amplitude, afkomstig van leem- of kleilagen worden nergens afgebeeld.

Het reflectiepatroon boven de grondwaterspiegel en voor zover waarneembaar ook daaronder, wijst op spoelzandwaaierafzettingen. Nergens is een slecht doorlatende klei- of leemlaag afgebeeld. In geen enkele opgenomen georadarsectie zijn sterkere reflecties met grote continuïteit waargenomen, die gerelateerd kunnen worden aan kleilagen. Het reflectiepatroon ('radar faciës') van subhorizontale reflecties met zwakke amplitude en geringe laterale continuïteit, is karakteristiek voor fluvioglaciale spoelzandwaaierafzettingen (van Overmeeren, 1997), waarbij de reflecties afkomstig zijn van korrelgrootte-overgangen in de zanden.

Het verschil tussen reflectiepatronen in spoelzandwaaierafzettingen en in gestuwde gebieden is duidelijk zichtbaar in het voorbeeld van Fig. 4.2. De sectie toont de overgang van de horizontale fluvioglaciale afzettingen in het westen en de scheefstaande afzettingen in het oosten van profiel 7 (zie locatiekaart, Fig. 2.1). Deze scheefstaande, naar het westen hellende reflecties vormen het westelijk deel van een anticlinaal. Deze anticlinale structuur is duidelijk afgebeeld in Fig. 4.3. Lang niet overal worden in gestuwde gebieden dergelijke fraaie glacio-tektonische structuren afgebeeld. Op veel plaatsen zijn gestuwde afzettingen namelijk zodanig verstoord, dat het reflectiepatroon overheerst wordt door chaotische reflecties met veel diffractie-hyperbolen. De verder oostelijk gelegen sectie in Fig. 4.4 is hiervan een voorbeeld.

In Fig. 4.2 is in het gestuwde gedeelte een duidelijke opbolling van de grondwaterspiegel reflectie zichtbaar. Dit wijst erop dat de voortplantingssnelheid van de radargolven in het gestuwde deel groter is dan de snelheid in de fluvioglaciale afzettingen.

In het overgangsgebied tussen de spoelzandwaaier en de stuwwal wordt langs profiel 7 boven de grondwaterspiegelreflectie een tweede, continue reflectie met grote amplitude waargenomen (Fig. 4.2). De grote amplitude van deze reflectie, die duidelijk wordt geïllustreerd in de met SEC versterking bewerkte sectie (Fig. 4.2b), wijst op een groot contrast in dielektrische constante. Mogelijk is dit een kleilaag. Deze reflectie loopt door in het gestuwde gebied en is daar scheefgesteld. In het gebied rond de in de bodem gelekte verontreiniging ontbreekt deze veronderstelde slecht doorlatende laag.

Profiel 2 (Bijlage 3)

Profiel 2 loopt ZO-NW, ongeveer loodrecht op de richting van profiel 7 (Fig. 2.1). De radarsectie eindigt op de 5-sprong, die ook de kruising van profiel 7 met de Oude Postweg vormt. Het profiel is opgenomen met 50 en 100 MHz antennes; deze secties zijn afgebeeld in bijlage 3. Het reflectiepatroon in de 100 MHz (Bijlage 3a) sectie vertoont grote gelijkenis met dat van profiel 7. Ook hier overheersen subhorizontale en golvende reflecties met een beperkte continuïteit, welke karakteristiek zijn voor fluvioglaciale afzettingen. De maximale doordringing is tot op de grondwaterspiegel, die een reflectie geeft met grote amplitude op een looptijd van ongeveer 120 ns en langs bijna het gehele profiel continu is. Op drie plaatsen langs dit profiel bevinden zich waarnemingsputten. De daarin tijdens het georadar veldwerk gepeilde grondwaterstanden komen goed overeen met waarden die uit de radarmetingen worden afgeleid (tabel 4.2).

Tabel 4.2: Grondwaterstanden afgeleid uit de georadarmetingen en gepeild in waarnemingsputten langs profiel 2.

waarnemingsput	positie (m) langs profiel 2	filterdiepte (m-mv)	diepte grondwaterspiegel (m-mv)	
			peilbuis	georadar (100 MHz)
301	519	47,5-48,5	9,6	9,6
403	551	10-11	10,0	10,1

De 50 MHz sectie (Bijlage 3b) heeft een grotere doordringing; de diepste reflecties hebben een looptijd van 300 ns, hetgeen overeenkomt, rekening houdend met een lage snelheid onder de grondwaterspiegel met een diepte van ongeveer 13 m. Significante reflecties met enige continuïteit worden onder de grondwaterspiegel echter niet geregistreerd. De grondwaterspiegelreflectie is geheel continu. Plaatselijk, b.v. tussen 410 en 460 m wordt ook hier een meervoudige reflectie van de grondwaterspiegel afgebeeld.

Behalve de grondwaterspiegel reflectie worden nergens in de sectie continue reflecties met grote amplitude waargenomen, zodat geconcludeerd kan worden dat



slecht doorlatende klei- of leemlagen met enige verbreiding niet aanwezig zijn.

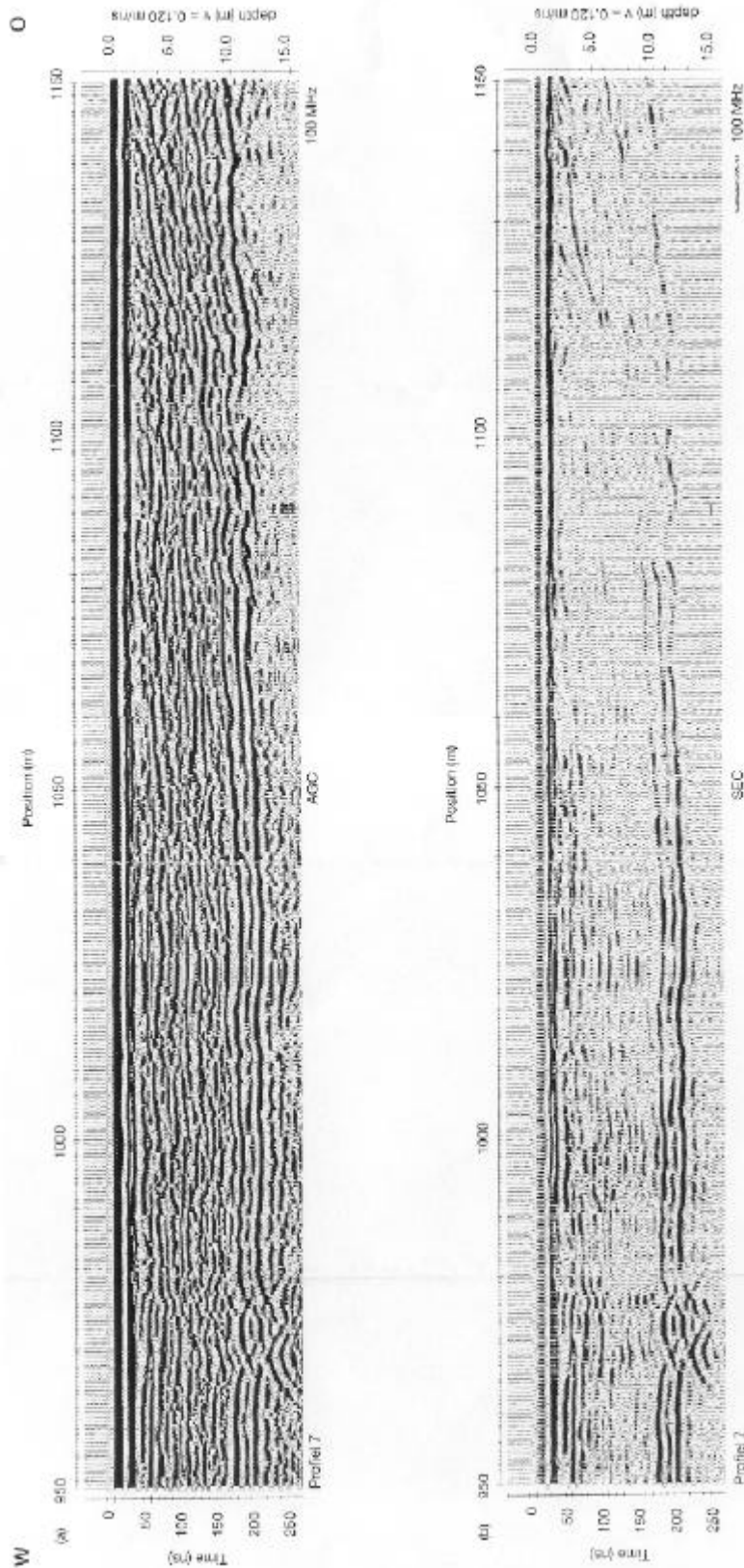


Fig. 4.2: De overgang van subhorizontale reflecties in fluvioglaciale afzettingen (sandr) naar scheefgestelde reflecties in gestuwde afzettingen; (a) AGC versterking, (b) SEC versterking.

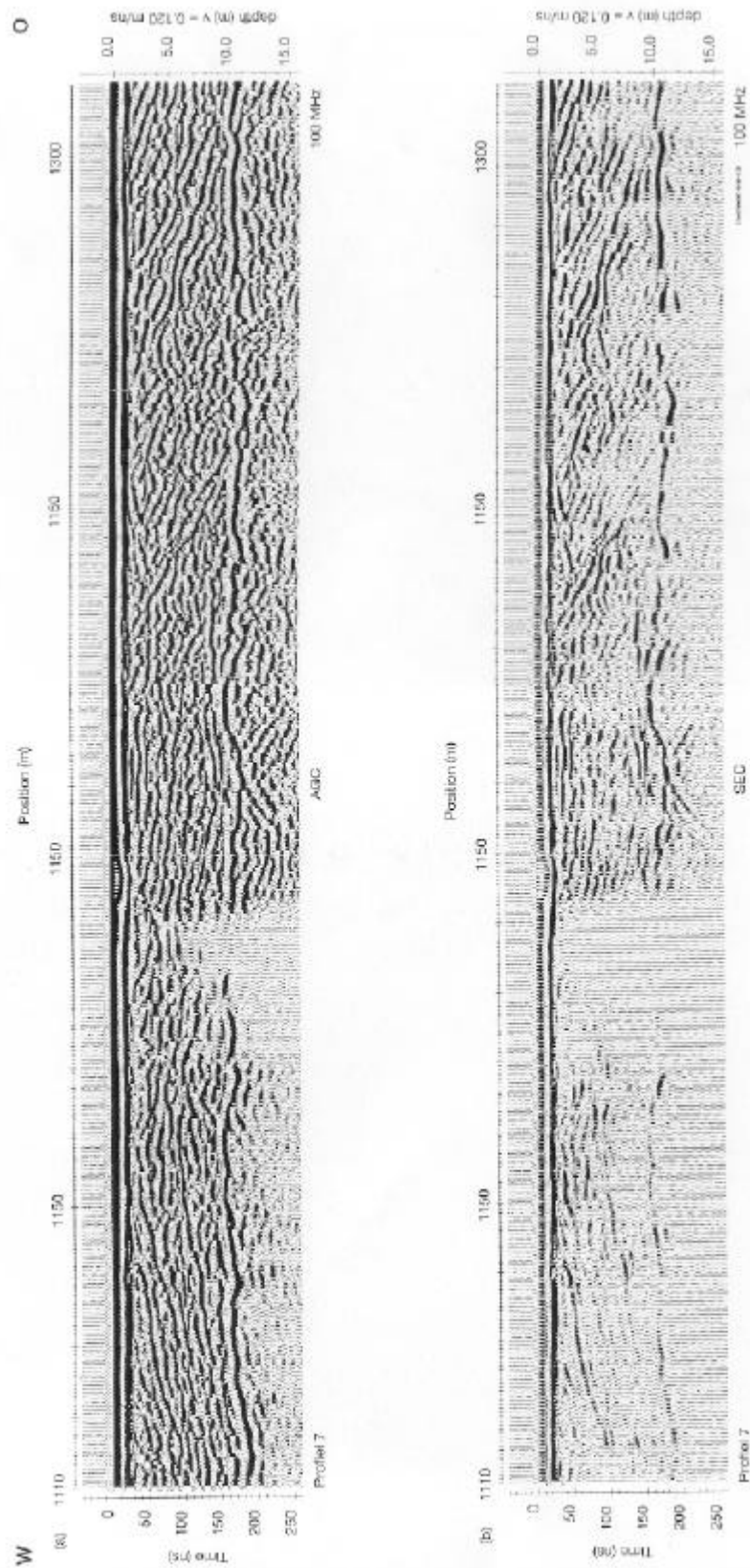


Fig. 4.3: Anticlinale structuur in reflectiepatroon van gestuwde afzettingen; (a) AGC versterking, (b) SEC versterking.

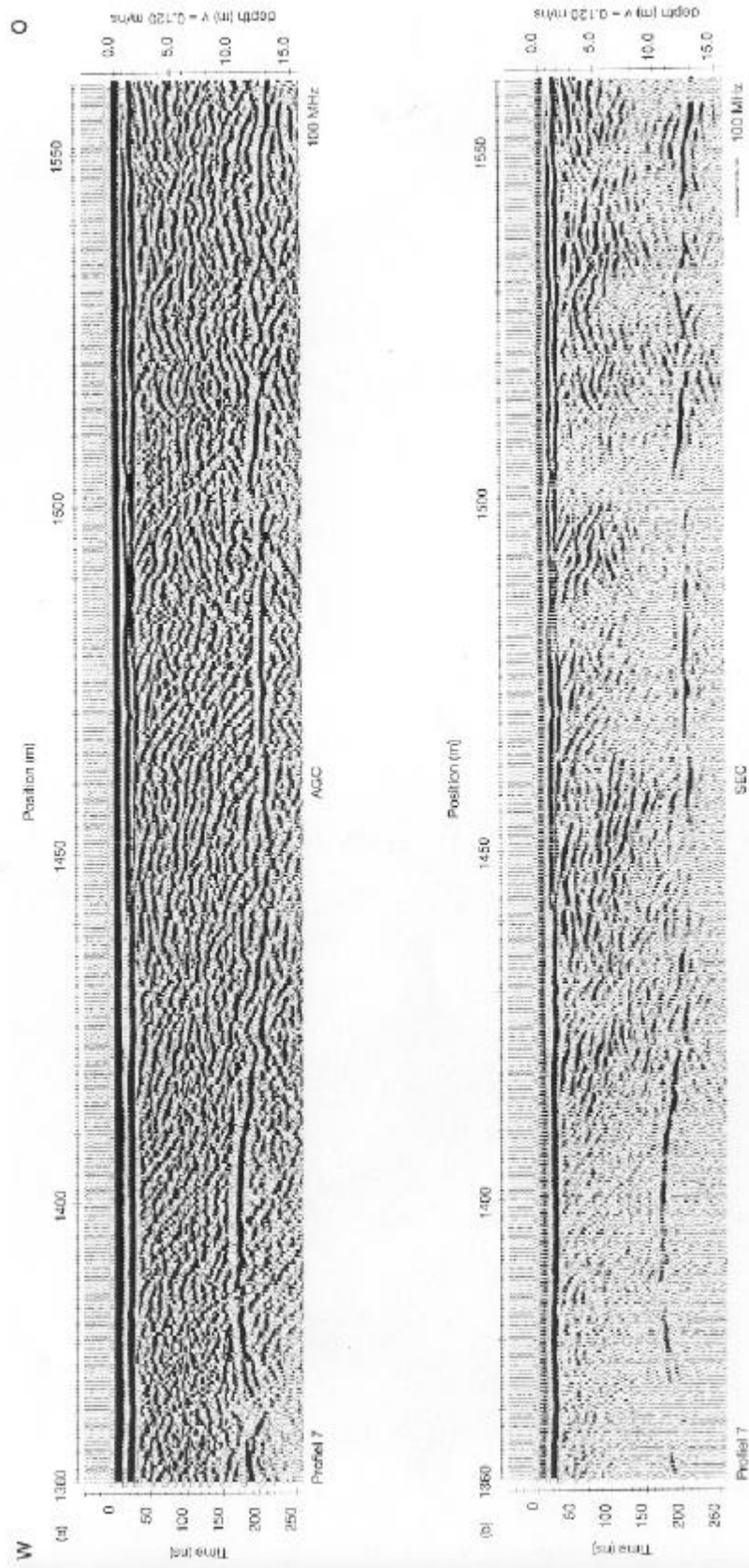


Fig. 4.4: Chaotische reflectiepatronen van gestuwde afzettingen; (a) AGC versterking, (b) SEC versterking.

4.3.2 De situatie rondom de verontreinigingsbron

De situatie rondom de verontreinigingsbron wordt getoond in Fig. 4.5 aan de hand van een drietal korte georadarsecties, waarvan de locatie rechtsboven in dezelfde figuur is aangegeven. Vergelijking van de radarsecties laat zien dat de reflecties dezelfde patronen vormen; subhorizontale en golvende reflecties met een beperkte continuïteit hebben de overhand. De structuren zijn niet waarneembaar richtingsafhankelijk. Reflecties met grotere amplitude en een grotere continuïteit, welke mogelijk van slecht doorlatende lagen afkomstig zijn, zijn niet geregistreerd. In de georadarsectie langs profiel 12, de Oude Postweg, zijn weliswaar meer continue horizontale reflecties zichtbaar (b.v. tussen positie 150 en 195 m), maar deze moeten eerder worden toegeschreven aan de storende invloed van kabels en leidingen langs deze weg, die binnen de bebouwde kom van Austerlitz ligt, dan aan geologische grenzen. Langs dit gehele profiel is de doordringing van de radargolven minder groot als gevolg van de dempende invloed van bestrating en asfaltering van deze weg. De grondwaterspiegel is in het getoonde deel van de sectie slechts fragmentarisch zichtbaar, b.v. bij positie 230-240 m.

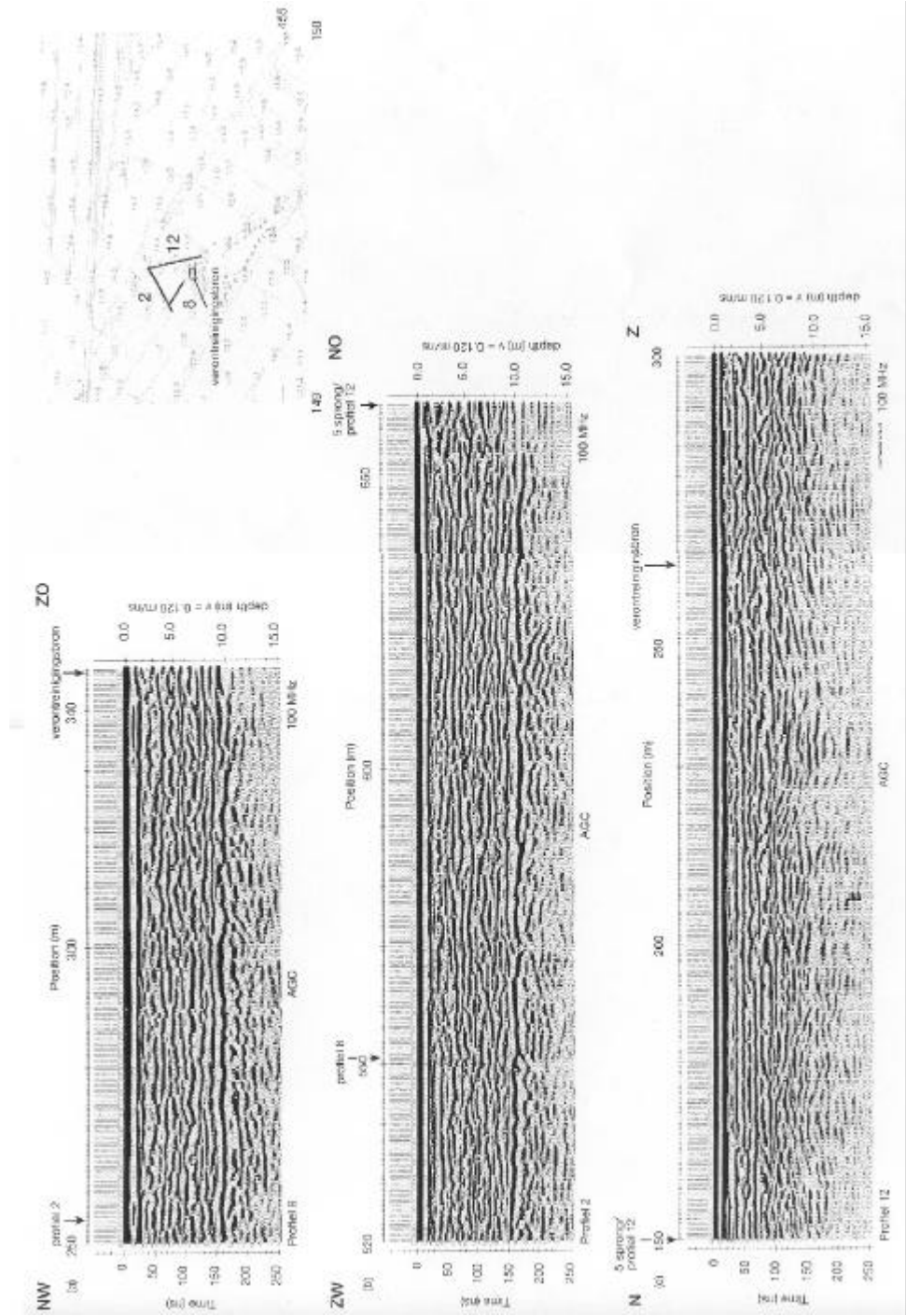


Fig. 4.5: Drie georadarsecties in de directe omgeving van de verontreinigingsbron

4.4 Conclusies georadar onderzoek

1. De gelaagdheid van het totale deel van de ondiepe ondergrond dat met georadar afgebeeld is subhorizontaal;
2. Het reflectiepatroon is kenmerkend voor fluvioglaciale sedimenten, die in een spoelzandwaaier (sandr) zijn afgezet. Dit betreft afzettingen in een hoog-energetisch milieu, waarin (veelal grove) zanden en grinden overheersen.
3. In de georadar secties worden, met uitzondering van de grondwaterspiegel, geen continue reflecties met grote amplitude waargenomen. Dit wijst op de afwezigheid van slecht doorlatende klei- of leemlagen.
4. De laterale afmetingen van de reflecties bedragen in het algemeen 10 à 15 m. Dit betekent dat permeabiliteitsverschillen als gevolg van variaties in korrelgrootte van de zanden een relatief geringe invloed hebben op de migratie van DNAPL's.
5. De horizontale gelaagdheid van de zanden met variabele korrelgrootte bijvloedt daarentegen wel de residuele verzadiging als gevolg van de horizontale versmering van de DNAPL's op korrelgrootte-overgangen. In horizontaal gelaagde fluvioglaciale zanden zal meer DNAPL blijven hangen dan in steilhellende, gestuwde formaties.

5 HRS (P-golven)

5.1 De HRS methode

Seismische reflectiemethoden zijn gebaseerd op de voortplanting van akoestische (geluids-) golven in de bodem. Akoestische golven kunnen worden opgewekt met verschillende bronnen. De meeste gebruikte methode is het tot ontploffing brengen van een kleine lading dynamiet in een boorgat. Wanneer de infrastructuur dit niet toelaat (b.v. dichtbij bebouwing), dan wordt een vibrator ingezet om de bodem vanaf het oppervlak in trilling te brengen. Een seismische bron wekt verschillende soorten golven op, waarvan de belangrijkste zijn: longitudinale golven (P-golven), transversale golven (S-golven) en oppervlakte golven. P-golven hebben de hoogste voortplantingssnelheid en worden het meest gebruikt in seismische exploratie.

Op grensvlakken tussen (aard)lagen met contrasterende akoestische eigenschappen wordt de golfenergie gereflecteerd en aan het aardoppervlak opgevangen door een, veelal groot, aantal ontvangers (gefoons). Voor de kartering van de ondiepe (30 tot 100 m) ondergrond worden de gefoons langs de profiellijnen geplaatst met een kleine onderlinge afstand van bijvoorbeeld 2 m en wordt om de 8 m een schot afgevuurd. De reflecties worden afgebeeld in seismogrammen, waarin de opnames van verschillende gefoons naast elkaar worden weergegeven. Na een uitvoerige bewerking wordt hieruit een seismische sectie samengesteld, welke een praktisch continu 2D beeld van de ondergrond geeft.

De mate van reflectie wordt bepaald door het contrast in de voortplantingssnelheid (v) en het soortelijk gewicht (ρ) tussen verschillende aardlagen. Deze fysische eigenschappen worden bepaald door de lithologie, compactie en de waterverzadiging van de afzettingen. De amplitude van seismische reflecties is in het algemeen erg klein. De seismische reflectiemethodes werken vooral goed als er slechts kleine contrasten in de bodem aanwezig zijn.

HRS seismiek richt zich op een verkenning met veel detail van de ondiepe ondergrond tussen ongeveer 30 en 100 à 200 m. In de praktijk blijkt het niet goed mogelijk om op land ondieper te kijken dan 30 m. De invloed van een lage-snelheidslaag is vrijwel altijd aanwezig bij onderzoek op het vaste land. In Nederland komt deze laag overeen met de bovenste meters van de bodem boven het grondwaterniveau. De kwaliteit van de data hangt voor een groot deel af van de voortplantingseigenschappen van de bovenste paar meter.

In een gemeten seismische sectie worden de reflecties tegen de reistijd afgebeeld. Voor de kartering van de ondergrond is echter niet de tijd, maar de diepte van een reflector van belang. Voor een nauwkeurige bepaling van de tijd-diepte relatie wordt vaak een zogenaamde checkshot survey in een boorgat uitgevoerd.

Seismisch onderzoek omvat drie onderdelen:

1. de data acquisitie
2. de data bewerking
3. de interpretatie van de gegevens.

Een uitgebreidere beschrijving van de principes en achtergronden van HRS alsook van de te Austerlitz uitgevoerde data acquisitie en data bewerking wordt gegeven in Bijlage 1. Hieronder wordt in het kort de ligging van de gemeten profielen omschreven. Daarna worden de interpretatie en de resultaten daarvan uitvoerig besproken.

5.2 Het uitgevoerde HRS onderzoek

Zoals reeds aangegeven in de inleiding is op basis van het feit dat de georadargegevens een penetratie van ongeveer 10 m toonden en naar verwachting de P-golven pas vanaf ongeveer 25 m gegevens zullen leveren, besloten om in plaats van 2 P-lijnen, 1 P-lijn op te nemen in combinatie met 1 S-lijn. Tabel 5.1 geeft informatie over de ligging van de seismische lijn.

Tabel 5.1: Informatie over de uitgevoerde seismische meting P-HRS te Austerlitz.

Meting	lengte	richting	positie
Profiel AP1	520 m (65 schoten)	west-oost	start (station 101): 149125,455512: 1ste gefoon (schot 1 op station 131) eind (station 416): 149670,455018: laatste gefoon

Het eerste station 101 ligt 25 m ten zuidoosten (in de richting van het pad waarlangs de lijn loopt) van het centrum van het fietspad langs de N224. De kruising met de Oude Postweg is op station 234 en 235.

5.3 Interpretatie en resultaten

Het resultaat van de HRS metingen is de seismische sectie, die is weergegeven in Fig. 5.1. Zoals uiteengezet in hoofdstuk 3 zijn kleilagen bepalend voor de migratie van DNAPL's; daarbij zijn ook dunne (enkele centimeters dikte) kleilagen van belang. Uit de reflectie seismiek (en uit de radar voor de bovenste 10 m) is vastgesteld dat op de locatie geen sprake is van scheefstaande of gestuwde lagen. De bovenste sedimenten betreffen een spoelzandwaaier (sandr), daaronder liggen door rivieren afgezette sedimenten.

De ondiepste kleilagen aangetroffen in de boorgaten in de omgeving van het onderzoeksgebied zijn aangegeven in tabel 3.6. De kleilaag in Sterksel/Urk of de top van Kedichem op ongeveer -24 tot -30 m NAP diepte komt in boring 301 van IWACO en in 32C-156 en 32D-114, de drie meest nabijgelegen boringen in de buurt voor, weliswaar met verschillende diktes. Op de locatie is de maaiveldhoogte ongeveer

+14 m NAP en zal de diepte van deze kleilaag, indien ze voorkomt, ongeveer 40-45 m bedragen. Deze diepte komt overeen met een tijd van ongeveer 57-63 ms.

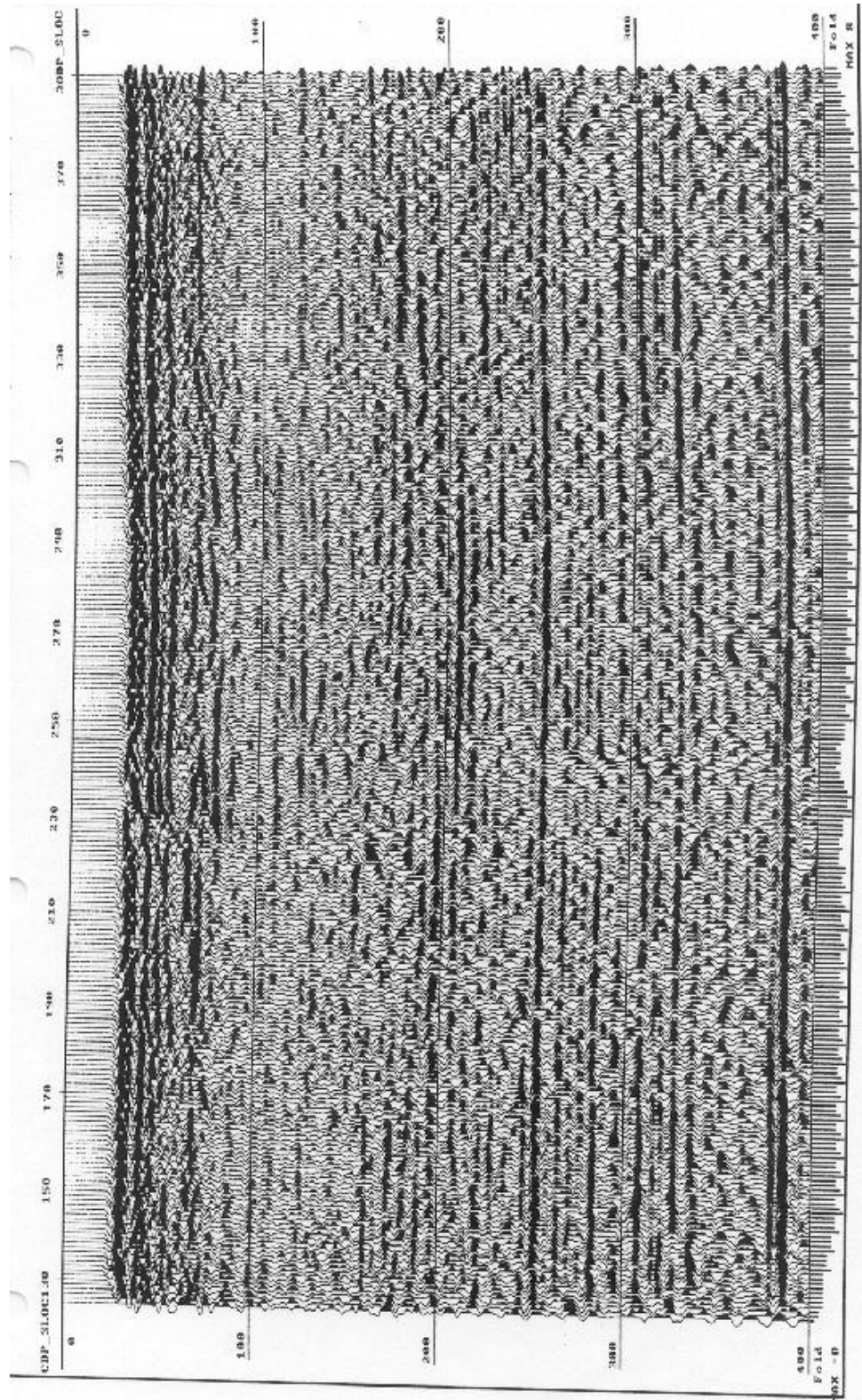


Fig. 5.1: HRS (P-golven) sectie langs het westelijk deel van profiel 7 te Austerlitz.

Kleilagen in de Kedichem Formatie bevinden zich volgens de boorbeschrijvingen op verschillende dieptes. Het gaat dan waarschijnlijk ook om verschillende afzonderlijke kleilichamen. De diktes variëren sterk. In het oostelijk deel van het gebied in boring 32C-156 komt 10 m klei voor, terwijl in 32D-114 slechts fijn zand voorkomt. In het westelijk deel is het beeld homogener: tussen de 30 en 38 m-NAP komt Kedichem klei voor, waarbij de diepte toeneemt richting de seismische lijn. Een diepte van 40 m-NAP komt op de profiel locatie overeen met 54 m-mv. In boring 302 van IWACO komt klei voor op 50 m-mv. Dit komt overeen met een reflectietijd van ongeveer 70 ms.

Op 67 ms is een reflectie zichtbaar in de oostkant en de westkant van het profiel. Vaak komen kleilagen in overigens zandige materialen overeen met duidelijke reflectoren (de top klei is dan vaak een einde van een afzettingscyclus). Duidelijk zichtbaar in de seismische sectie, is dat de genoemde reflectie niet continu is in het midden van het profiel, maar wordt afgesneden door een structuur welke een insnijding en latere opvulling suggereert. Deze reflectie kan overeenkomen met ofwel de kleilaag in Sterksel ofwel de Kedichem klei. Voor het onderhavige project is de situatie rond de DNAPL-bron van belang. Duidelijk is dat de reflecties over het profiel niet continu zijn. De afstand tussen DNAPL-bron en profiel bedraagt ongeveer 100 m, terwijl de breedte van de geul meer dan 200 m bedraagt. Waarschijnlijk is een eventuele kleilaag dan ook niet continu onder de DNAPL-bron en kon de DNAPL verder naar beneden migreren. Kleilichamen gerelateerd aan reflecties hebben een laterale afmeting van ongeveer 10-40 m.

Indien geen voldoende continue klei aanwezig is in Sterksel en Kedichem, kan de DNAPL verder zakken tot aan eventuele lokale kleilagen in de Harderwijk of de Tegelen klei (ongeveer 90 m-NAP, 138 ms). In de Harderwijk Formatie komt in boring 32C-156 op 70 m-NAP (90 ms) voor, maar in de andere boringen in de buurt is geen klei aanwezig. De seismische sectie is rond de 90 ms transparant en amorf en geeft geen indicatie van de aanwezigheid van kleilagen. De klei in de Tegelen Formatie is in vele boringen aanwezig. De relatieve continuïteit van de reflecties in de Tegelen Formatie (rond 140 ms) geeft aan dat de aanwezige klei een grote laterale uitgebreidheid heeft. Het is waarschijnlijk dat, bij voldoende aanvoer, de DNAPL's tot de klei in de Tegelen Formatie zijn gedaald.

De ondiepere reflector op ongeveer 40 ms (ongeveer 26 m) wordt verondersteld overeen te komen met de overgang Drente - Urk/Sterksel Formatie. Waarschijnlijk is de bovenkant Urk/Sterksel een erosievlak geweest voordat de Drente Formatie werd afgezet. In het algemeen geldt dat een erosievlak een sterke reflectie veroorzaakt. Deze reflectie is superkritisch opgenomen op grote offsets en komt met name sterk naar voren indien ook de grote offsets worden meegenomen in de stack.

Schematisch is de opbouw van de ondergrond weergegeven in Fig. 5.2.

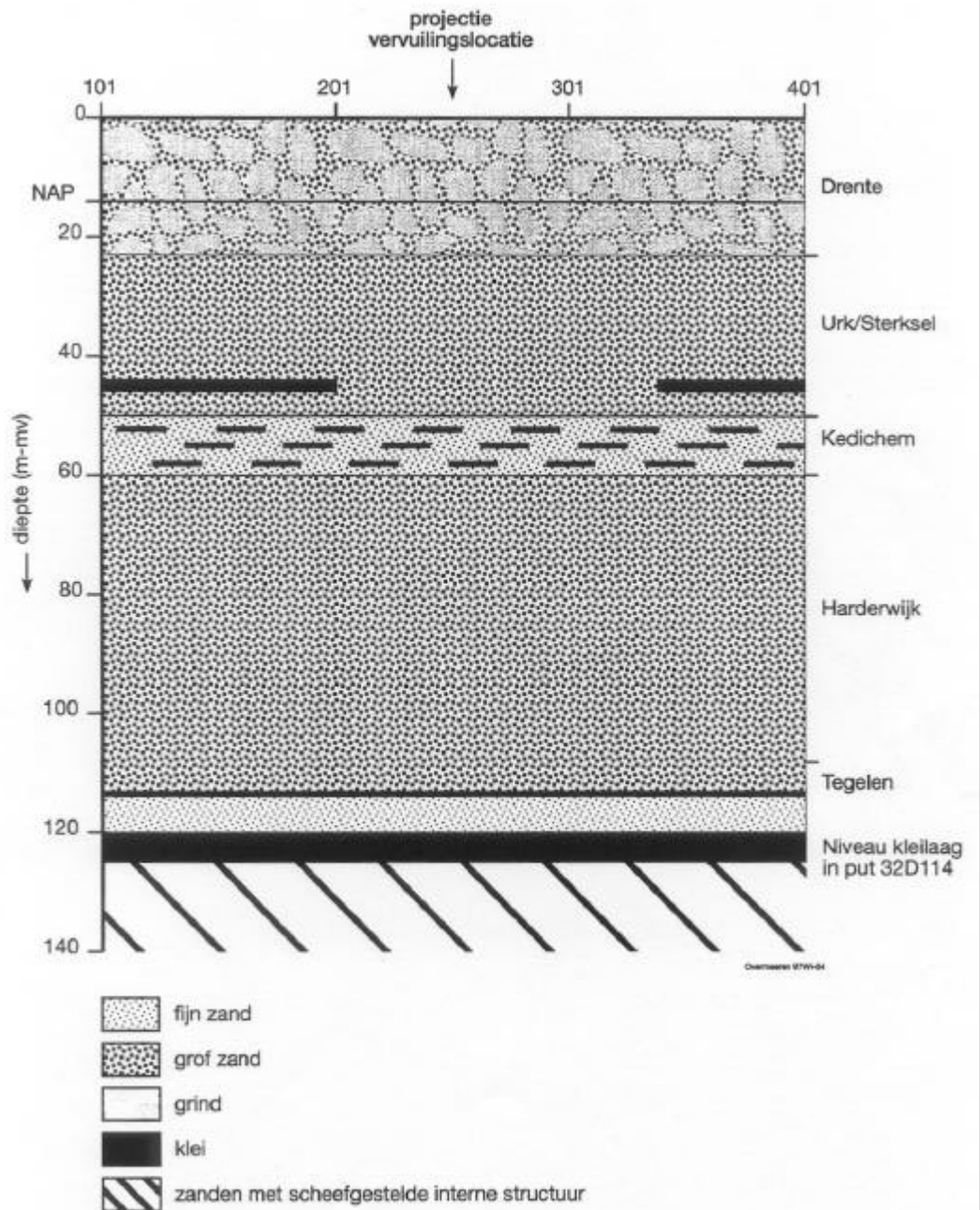


Fig. 5.2: De uit HRS (P-golven) en boringen afgeleide schematische opbouw van de ondergrond in de directe omgeving van de DNAPL locatie te Austerlitz.

5.4 Conclusies HRS onderzoek

De reflectie seismiek met P-golven, heeft een seismische sectie opgeleverd van matig tot redelijke, veelal interpreteerbare kwaliteit. Op deze seismische sectie zijn reflecties zichtbaar vanaf ongeveer 20 m diepte. De belangrijkste informatie zichtbaar op de seismische sectie is een geulachtige structuur in de Sterksel Formatie. Deze geul geeft aan dat, indien er al een kleilaag lokaal aanwezig is in de Sterksel Formatie, deze over het profiel niet continu is. Ook in de Kedichem klei lijkt zich geen belangrijke continue kleilaag te bevinden. Waarschijnlijk is een dieper gelegen klei in de Tegelen Formatie wel continu over het profiel en de belangrijkste barrière voor de neerwaartse migratie van DNAPL's.

6 SRS (S-golven)

6.1 De SRS methode

S-golven seismische reflectie seismiek is evenals HRS een hoge resolutie seismische reflectiemethode. Ook SRS is gebaseerd op de voortplanting van akoestische (geluids-) golven in de bodem. S-golven of schuifgolven zijn transversale golven, welke zich met een langzamere snelheid dan longitudinale P-golven voortplanten. Voor het onderhavige onderzoek zijn de S-golven opgewekt met een nieuw ontwikkelde vibrator.

Ook S-golven worden gereflecteerd op grensvlakken tussen (aard)lagen met contrasterende akoestische eigenschappen. De reflecties worden aan het aardoppervlak opgevangen door ontvangers (gefoons). SRS richt zich op de kartering van de ondiepe (0-50 m) ondergrond, waarbij de gefoons dicht op elkaar (bijvoorbeeld met een interval van 0,5 m) langs een profiel worden geplaatst met een eveneens kort schotinterval (i.e. locaties van vibratortrillingen) van b.v. 1 m. De reflecties worden afgebeeld in seismogrammen, waarin de opnames van verschillende gefoons naast elkaar worden weergegeven. Na een uitvoerige bewerking wordt hieruit een seismische sectie samengesteld, welke een praktisch continu 2D beeld van de ondergrond geeft.

SRS seismiek richt zich op een verkenning met veel detail van de zeer ondiepe ondergrond tussen maaiveld en ongeveer 50 m.

SRS omvat evenals HRS drie onderdelen:

1. de data acquisitie
2. de data bewerking
3. de interpretatie van de gegevens.

Een uitgebreidere beschrijving van de principes en achtergronden van SRS alsook van de te Austerlitz uitgevoerde data acquisitie en data bewerking wordt gegeven in Bijlage 1. Hieronder worden in het kort de gemeten profiellijn omschreven en de resultaten van SRS besproken.

6.2 Het uitgevoerde SRS onderzoek

SRS metingen zijn uitgevoerd langs dezelfde profiellijn als de HRS metingen. Tabel 6.1 geeft informatie over de ligging van de seismische lijn.

Tabel 6.1: Informatie over de uitgevoerde seismische meting P-HRS te Austerlitz.

Meting	lengte	richting	positie
Profiel AP1	520 m (65 schoten)	west-oost	start (station 101): 149125,455512: 1ste gefoon (schot 1 op station 131) eind (station 416): 149670,455018: laatste gefoon

6.3 Interpretatie en resultaten

De resultaten van de schuifgolfseismiek zijn teleurstellend. Geen van de geproduceerde stacks laat duidelijk reflecties zien. Een voorbeeld van een verkregen SRS seismische sectie is Fig. 6.1. Hier en daar zijn signalen zichtbaar welke mogelijk reflecties zijn. Het is echter niet gelukt deze voldoende te versterken ten opzichte van andere signalen.

De oorzaak van de slechte resultaten is vooralsnog niet duidelijk. Wel is uit de analyse duidelijk dat slechts een klein deel van het opgenomen signaal een reflectie-signaal is en dat andere signalen (Love-golven, back-scatter) het beeld overheersen. Verder is het zo dat in de ondergrond in de bovenste 30 m geen duidelijke zand-klei overgang voorkomt. Wellicht zijn de aanwezige contrasten te gering om tot meetbaar reflectiesignaal aanleiding te geven.

6.4 Conclusie SRS onderzoek

Het SRS onderzoek heeft geen bruikbare seismische sectie van de ondergrond opgeleverd.

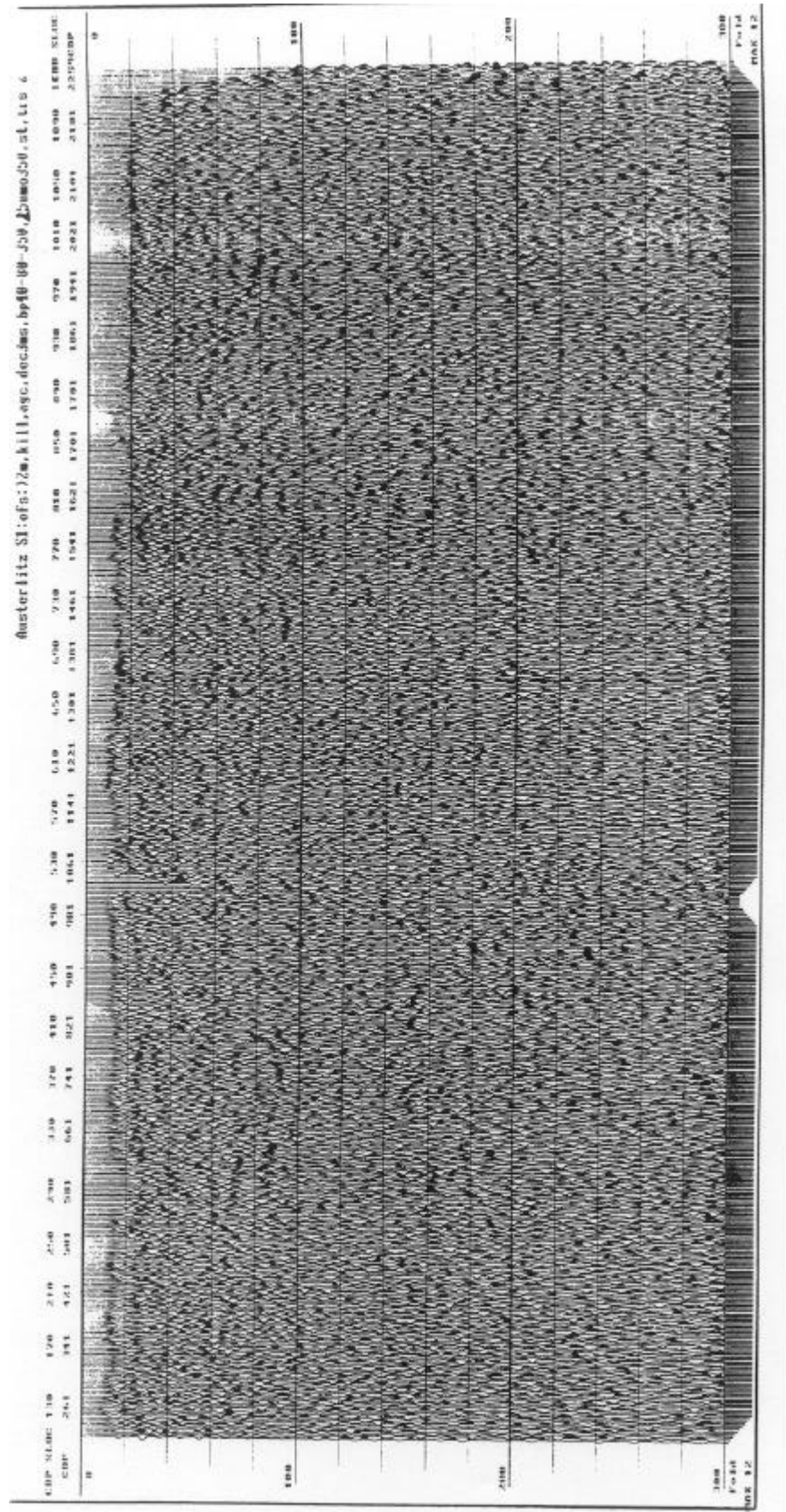


Fig. 6.1: SRS (S-golven) sectie langs het westelijk deel van profiel 7 te Austerlitz.

7 Complementair geofysisch onderzoek voor een gedetailleerde bodemverkenning van een DNAPL locatie

7.1 Evaluatie van de toegepaste methodiek

Op de onderzochte DNAPL locatie te Austerlitz is met behulp van complementaire toepassing van hoge resolutie geofysische technieken een duidelijk en gedetailleerd beeld van de ondergrond verkregen. Daarbij is aangetoond dat de ondergrond op en rond de verontreinigde locatie niet gestuwd is. De reflecties tonen een vrijwel horizontale gelaagdheid. De radarreflectiepatronen opgebouwd uit subhorizontale reflecties met zwakke amplitude en geringe laterale verbreiding zijn karakteristiek voor fluvioglaciale spoelzandwaaierafzettingen (sandr). De grondwaterspiegel met een grote amplitude, grote continuïteit en karakteristieke negatieve polariteit contrasteert heel sterk met de reflecties van lithologische oorsprong. Overal langs de radarsecties is de grondwaterspiegel duidelijk zichtbaar. Onder de grondwaterspiegel echter, is de doordringing van de radargolven op deze locatie zeer gering, zodat de doordringingsdiepte tot ongeveer 10 m beperkt is gebleven. De grondwaterspiegel is de enige reflectie met grote amplitude en continuïteit die in het onderzoek is waargenomen. Daaruit wordt geconcludeerd dat in de ondergrond tot 10 m diepte nergens slecht doorlatende klei- of leemlagen aanwezig zijn. Deze conclusie wordt bevestigd door de boorbeschrijvingen van een aantal peilbuizen (Iwaco, 1997) en de waargenomen monsters uit een groot aantal geboorde schotgaten langs het seismische profiel.

De horizontale opbouw van de ondergrond blijkt ook uit de diepere, seismische verkenning. Uit de P-golven sectie, die informatie geeft vanaf een diepte van ongeveer 20 m komen duidelijke, horizontale reflectoren naar voren op dieptes van ongeveer 45 m en 120 m. De ondiepere reflectie vertegenwoordigt mogelijk een leem- of kleilaag in de Urk/Sterksel Formatie. In de directe omgeving van de verontreinigingsbron lijkt een erosiegeul te zijn gevormd en ontbreekt deze reflector. De verticale migratie van de in de bodem gelekte DNAPL zal zich daarom, afhankelijk van de hoeveelheid, hebben kunnen voortzetten tot een scheidende laag op grotere diepte. De reflectie op 120 m diepte is continu en mogelijk een kleilaag van de Tegelen Formatie.

In Bijlage 4 zijn de georadarsectie en de seismische (P-golf) sectie onder elkaar gezet om te illustreren dat de twee technieken duidelijk overeenkomsten vertonen betreffende de techniek (golfvoortplanting) en daarmee verband houdende hoge resolutie en qua dieptebereik in principe complementair zijn. Afhankelijk van de grondwaterstand kan in dit diepte-interval echter een hiaat zitten, zoals het geval in het onderzochte gebied bij Austerlitz. S-golven seismiek lijkt een potentieel geschikte methode om dit hiaat op te vullen. Langs profiel 7 te Austerlitz zijn in de S-golven sectie echter geen duidelijke reflecties geregistreerd.

Het is niet geheel duidelijk of dit het gevolg is van het ontbreken van duidelijk contrasterende grenzen in de ondiepe ondergrond tot 40 m of dat ook de signaalsterkte (de bron of de koppeling daarvan met de bodem) onvoldoende was. Nader onderzoek van deze methode is noodzakelijk om hierover uitsluitsel te geven.

7.2 Een aanzet tot een protocol

Met behulp van hoge resolutie geofysische technieken kan de ondergrond van een verontreinigde locatie niet-destructief gedetailleerd in beeld worden gebracht. Hoge resolutie wordt verkregen met die geofysische methoden welke op golfvoortplanting zijn gebaseerd. Dit zijn georadar met elektromagnetische golven en seismische methoden met akoestische golven. Echter, deze methoden kunnen niet of niet optimaal in elke omgeving worden ingezet. Zo dringen radargolven niet door in een elektrisch geleidende omgeving (klei, brak/zout water) en is P-golf seismiek ongeschikt in gebieden waarin gas voorkomt in de bodem en minder goed inzetbaar in gebieden met diepe grondwaterstanden. Het dieptebereik van de methodes is dus gebiedsafankelijk, zodat een inventarisatie en/of verkenning nodig is voorafgaand aan de uitvoering van geofysische metingen. Onderstaande lijst, ondersteund door het diagram van Fig. 7.1 is een aanzet tot een protocol voor de inzet van (complementaire) geofysische methoden bij de karakterisatie van de ondergrond.

1. Vaststelling van te onderzoeken dieptebereik; onderstaand scenario gaat uit van een dieptebereik van 0 tot 50 à 200 m.
2. Inventarisatie van beschikbare gegevens betreffende de ondergrond van het te onderzoeken gebied.
3. Is het gebied elektrisch geleidend (klei, zout)? Zo ja: ongeschikt voor georadar.
4. Komen in de bovenste delen van de ondergrond veenafzettingen (met gas) van aanzienlijke dikte voor? Zo ja: ongeschikt voor P-golven seismiek.
5. Hoe diep zit de grondwaterspiegel? erg diep: minder geschikt voor P-golven seismiek.
6. Indien geschikt: eerste verkenning van het gebied met georadar, waarbij ook informatie over de diepte tot de grondwaterspiegel wordt verkregen.
7. Wordt een diepte van meer dan 20 m bereikt en is het gebied geschikt voor P-golven seismiek: selectie van tracés en uitvoering van P-golf seismiek.
8. Wordt met P-golf seismiek informatie verkregen vanaf een diepte van 20 m? Zo ja, dan wordt het totale dieptebereik bedekt met georadar en P-golf seismiek. Zo niet, dan moet aanvullend S-golf seismiek worden uitgevoerd.

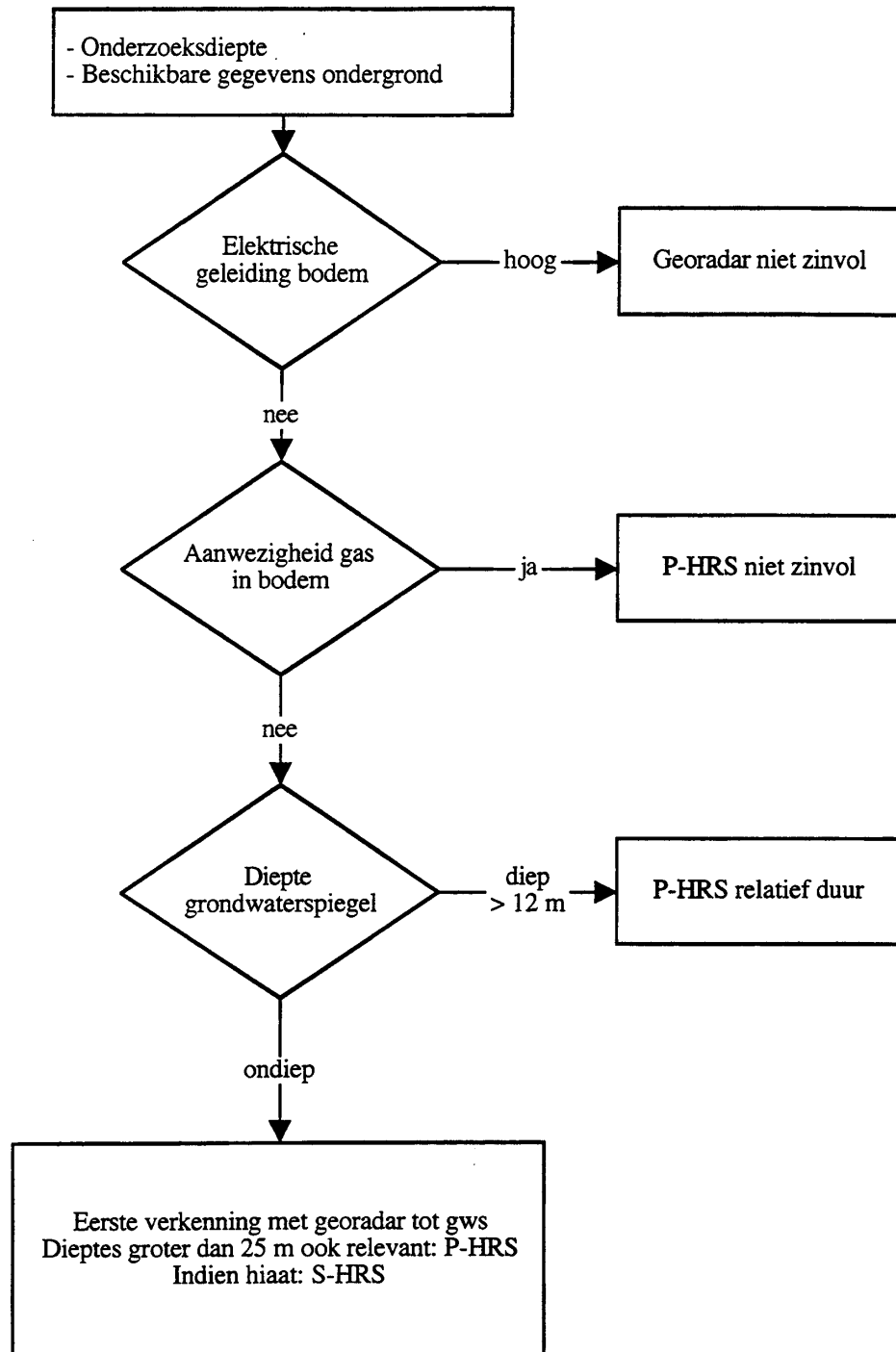


Fig. 7.1: Protocol toepassing geofysica voor ondergrondkarakterisatie.

8 Conclusies en aanbevelingen

De opbouw van de ondergrond van de DNAPL locatie te Austerlitz is gedetailleerd in kaart gebracht door georadar (GPR) tot op de grondwaterspiegel op een diepte van ongeveer 10 m en door P-golven reflectie seismiek (HRS) vanaf een diepte van ongeveer 20 m. S-golven seismiek (SRS) heeft geen duidelijk beeld gegeven van het hiaat tussen 10 en 20 m diepte. De resultaten van het geofysisch onderzoek, gekoppeld aan aanvullende informatie uit boringen kan als volgt worden samengevat:

- De ondergrond is tot op een diepte van ruim 20 m opgebouwd uit subhorizontale fluvioglaciale afzettingen (Formatie van Drenthe); deze bestaan uit, veelal grof, zand en grind.
- Korrelgrootte-overgangen in de zandige formaties en fijnzandige lenzen van beperkte laterale omvang zullen de verticale migratie van infiltrerende DNAPL plaatselijk remmen en daarmee de DNAPL verbreiden. Gezien de grote laterale inhomogeniteit van de fluvioglaciale afzettingen zal de omvang hiervan echter beperkt zijn.
- Mogelijk bevindt zich een eerste scheidende laag in de Formatie van Urk/Sterksel of Kedichem op een diepte van ongeveer 45-50 m. Deze laag vertoont zeer discontinue reflecties in het seismische profiel in de onmiddellijke omgeving van de DNAPL bron.
- In de bodem gelekte DNAPL's zullen derhalve dieper hebben kunnen migreren tot op de eerstvolgende scheidende laag. Kleilichamen in de onderliggende Formatie van Harderwijk lijken gezien het ontbreken van continue reflecties in de seismische secties een geringe laterale verbreiding te hebben. Het is daarom waarschijnlijk dat DNAPL's dieper verticaal migreren tot op de kleilaag in de Formatie van Tegelen op ongeveer 120 m diepte, welke een redelijk continue reflectie in de seismische sectie geeft.

Vanwege de veronderstelde verticale migratie van de DNAPL, wordt aanbevolen om sonderingen en boringen gericht op het aantonen van puur product uit te voeren in de directe omgeving van de DNAPL bron; indien de uit te voeren sonderingen aanwijzingen geven dat de DNAPL migratie zich tot grote diepte heeft voortgezet, wordt aanbevolen de boringen door te zetten tot op de scheidende kleilaag van de Formatie van Tegelen, die zich op een diepte van ongeveer 120 m moet bevinden.

9 Dankbetuiging

Met dank aan OYO-CAG, Nieuwegein, voor het beschikbaar stellen van hun S-golf vibrator en de medewerking bij de uitvoering van de metingen daarmee.

10 Verwijzingen

- Danbom, S.H. en Domenico, S.N., 1988. Shear wave exploration. Geophysical Development Series Volume 1. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa.
- Davis J.L. en Annan, A.P., 1989. Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting* 37 (5), 531-551.
- DNAPLKAR basisprojectplan (Karakterisatie van DNAPL sites), 1997. Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO en Ingenieursbureau 'Oranjewoud' B.V. (document 81052).
- Intron-Bodemtech, 1994. Nader bodemonderzoek op de locatie Oude Postweg 8 te Austerlitz -locatiecode UT/240-0050-, Intron-Bodemtech, rapportnummer 94152a.
- Iwaco, 1997. Nader onderzoek derde fase Oude Postweg 8 te Austerlitz. Concept rapport, Iwaco, Rotterdam.
- Maarleveld, G.C., 1981. The sequence of ice-pushing in the Central Netherlands. *Mededelingen Rijks Geologische Dienst* 34: 2-6.
- Overmeeren, R.A. van, 1993. Grondradar : een nieuwe geofysische techniek voor grondwaterverkenning. *H₂O* (26) nr. 21, 610-617.
- Overmeeren, R.A. van, 1997. Radar facies of unconsolidated sediments in the Netherlands - a radar stratigraphy interpretation method for hydrogeology. *Journal of Applied Geophysics* (in druk).
- Riezebos, H.Th. en Augustinus, P.G.E.F., 1965. Verslag van een sedimentologisch sandr-onderzoek. Faculteit Aardwetenschappen, Universiteit Utrecht.
- Yilmaz, Ö., 1987. *Seismic Data Processing*. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, OK, U.S.A., 526 pp.
- Zagwijn, W. en Staalduinen, C.J. van, 1975. Toelichting bij de geologische overzichtskaarten van Nederland. Rijks Geologische Dienst, Haarlem.

Bijlagen

De bijlagen zijn niet in de digitale versie van het rapport opgenomen.