

NOBIS 95-2-15
ONDERZOEK NAAR DE TOEPASSINGSMOGELIJKHE-
DEN VAN SEISMISCHE TOMOGRAFIE VOOR DE
BEPALING VAN DE DOORLATENDHEID VAN DE
ONDERGROND

drs. L. Dijkshoorn (Rijks Geologische Dienst)

mei 1997

Gouda, CUR/NOBIS

Auteursrechten

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of op enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van CUR/NOBIS.

Het is toegestaan overeenkomstig artikel 15a Auteurswet 1912 gegevens uit deze uitgave te citeren in artikelen, scripties en boeken, mits de bron op duidelijke wijze wordt vermeld, alsmede de aanduiding van de maker, indien deze in de bron voorkomt. "©"Onderzoek naar de toepassingsmogelijkheden van seismische tomografie voor de bepaling van de doorlatendheid van de ondergrond", mei 1997, CUR/NOBIS, Gouda."

Aansprakelijkheid

CUR/NOBIS en degenen die aan deze publicatie hebben meegewerkt, hebben een zo groot mogelijke zorgvuldigheid betracht bij het samenstellen van deze uitgave. Nochtans moet de mogelijkheid niet worden uitgesloten dat er toch fouten en onvolledigheden in deze uitgave voorkomen. Ieder gebruik van deze uitgave en gegevens daaruit is geheel voor eigen risico van de gebruiker en CUR/NOBIS sluit, mede ten behoeve van al degenen die aan deze uitgave hebben meegewerkt, iedere aansprakelijkheid uit voor schade die mocht voortvloeien uit het gebruik van deze uitgave en de daarin opgenomen gegevens, tenzij de schade mocht voortvloeien uit opzet of grove schuld zijdens CUR/NOBIS en/of degenen die aan deze uitgave hebben meegewerkt.

Copyrights

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording and/or otherwise, without the prior written permission of CUR/NOBIS.

It is allowed, in accordance with article 15a Netherlands Copyright Act 1912, to quote data from this publication in order to be used in articles, essays and books, unless the source of the quotation, and, insofar as this has been published, the name of the author, are clearly mentioned. "©"Applicability of seismic tomography for the determination of the permeability of the subsurface", May 1997, CUR/NOBIS, Gouda, The Netherlands."

Liability

CUR/NOBIS and all contributors to this publication have taken every possible care by the preparation of this publication. However, it can not be guaranteed that this publication is complete and/or free of faults. The use of this publication and data from this publication is entirely for the user's own risk and CUR/NOBIS hereby excludes any and all liability for any and all damage which may result from the use of this publication or data from this publication, except insofar as this damage is a result of intentional fault or gross negligence of CUR/NOBIS and/or the contributors.

Titel rapport

Onderzoek naar de toepassingsmogelijkheden van seismische tomografie voor de bepaling van de doorlatendheid van de ondergrond

CUR/NOBIS rapportnummer

95-2-15

Project rapportnummer

95-2-15

Auteur(s)

drs. L. Dijkshoorn

Aantal bladzijden

Rapport: 26

Bijlagen: 19

Uitvoerende organisatie(s) (Consortium)

Rijks Geologische Dienst (Heerlen, 045-5616464)

NV Waterleidingbedrijf Midden Nederland (Utrecht, 030-2487211)

Uitgever

CUR/NOBIS, Gouda

Samenvatting

In dit rapport worden de mogelijkheden van seismische tomografie voor de bepaling van de heterogeniteit in lithologie en doorlatendheid van de ondergrond onderzocht.

Met behulp van steekmonsters, verticale doorlatendheidsmetingen, seismische snelheidstomogrammen en seismische dempingstomogrammen is een tweedimensionale lithologische sectie en een doorlatendheidssectie van de ondergrond gemaakt in het studiegebied nabij Linschoten (Utrecht).

Trefwoorden**Gecontroleerde termen:**

geologie, Kwartair, onderzoek, technieken, verontreinigde grond

Vrije trefwoorden:

boorgatmetingen, cross-borehole, geofysica, heterogeniteit ondergrond, seismische tomografie

Titel project

Onderzoek naar de toepassingsmogelijkheden van seismische tomografie voor de bepaling van de doorlatendheid van de ondergrond

Projectleiding

Rijks Geologische Dienst
(drs. L. Dijkshoorn, 045-5616464)

Dit rapport is verkrijgbaar bij:

CUR/NOBIS, Postbus 420, 2800 AK Gouda

Report title

Applicability of seismic tomography for the determination of the permeability of the subsurface.

CUR/NOBIS report number

95-2-15

Project report number

95-2-15

Author(s)

drs. L. Dijkshoorn

Number of pages

Report: 26

Appendices: 19

Executive organisation(s) (Consortium)

Rijks Geologische Dienst (Heerlen, +3145-5616464)

NV Waterleidingbedrijf Midden Nederland (Utrecht, 030-2487211)

Publisher

CUR/NOBIS, Gouda

Abstract

This report describes the possibilities of seismic tomography for determination of heterogeneous subsurface lithology and permeability.

A lithological cross-section and a permeability cross-section have been derived from several types of data in the study area near Linschoten (Utrecht, Netherlands).

Keywords**Controlled terms:**

geology, polluted soil, Quarternary, research, techniques

Uncontrolled terms:

cross-borehole measurements, geophysics, seismic tomography, subsurface heterogeneities

Project title

Applicability of seismic tomography for the determination of the permeability of the subsurface.

Projectmanagement

Rijks Geologische Dienst
(drs. L. Dijkshoorn, +31 455616464)

This report can be obtained by: CUR/NOBIS, PO Box 420, 2800 AK Gouda, The Netherlands
Dutch Research Programme In-Situ Bioremediation (NOBIS)

VOORWOORD

Bij biotechnologische in-situ sanering is een gedetailleerd beeld van de permeabiliteit van de ondergrond noodzakelijk. Door het adequaat beschrijven van de heterogeniteit van de ondergrond kan het ontwerp van een biotechnologisch in-situ saneringssysteem afgestemd worden op de eisen die de ondergrond stelt.

Binnen dit onderzoek is nagegaan welke mogelijkheden de seismische tomografie biedt om de permeabiliteit van de ondergrond te bepalen.

Het onderzoek is door de Rijks Geologische Dienst (per januari 1997 opgegaan in het Nederlandse Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen (NITG-TNO)) in samenwerking met het Waterleidingbedrijf Midden Nederland uitgevoerd.

In april 1996 is begonnen met de uitvoering van het door de Stichting NOBIS gesubsidieerde project: "Onderzoek naar de toepassings-mogelijkheden van seismische tomografie voor de bepaling van de doorlatendheid van de ondergrond". Voor u ligt het eindrapport van dit project.

mei 1997

INHOUD

	SAMENVATTING	vi
	SUMMARY	vii
Hoofdstuk 1	INLEIDING	1
Hoofdstuk 2	THEORIE	4
	2.1 Principes van de seismische tomografie	4
	2.2 Relatie tussen de hydraulische doorlatendheid en de snelheid	6
	2.3 Cluster analyse van de snelheidstomogrammen	8
	2.4 Flowdiagram van de methode	8
Hoofdstuk 3	WERKWIJZE	9
	3.1 Regionaal	9
	3.1.1 Pulsmonsters van boringen	9
	3.1.2 Gamma logs	10
	3.2 Lokaal	10
	3.2.1 Steekmonsters van boringen	10
	3.2.2 Hydraulische doorlatendheidsmetingen	10
	3.2.3 P- en S-suspension log	10
	3.2.4 Seismische cross-hole metingen	11
	3.2.5 Snelheids- en dempingstomogrammen	13
Hoofdstuk 4	INTERPRETATIE	15
	4.1 Regionale geologische interpretatie	15
	4.1.1 Holocene afzettingen	15
	4.1.2 Pleistocene afzettingen	16
	4.2 Lokale interpretatie	20
	4.2.1 Lithologische interpretatie	20
	4.2.2 Doorlatendheidsinterpretatie	21
	4.3 Combinatie regionale met lokale interpretatie van de cross-sectie	22
Hoofdstuk 5	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	24
	LITERATUUR	25
Bijlage	A1 BOORBESCHRIJVING VAN BORING 43	
Bijlage	A2 BOORBESCHRIJVING VAN BORING 44	
Bijlage	B1 STEEKMONSTERBESCHRIJVING, DOORLATENDHEIDSMETINGEN EN GAMMA LOG VAN BORING 43	
Bijlage	B1 STEEKMONSTERBESCHRIJVING, DOORLATENDHEIDSMETINGEN EN GAMMA LOG VAN BORING 44	

Bijlage	C1	P- EN S-SUSPENSION LOG VAN BORING 43
Bijlage	C1	P- EN S-SUSPENSION LOG VAN BORING 44
Bijlage	D	EFFECTEN VAN ANISOTROPIE VAN DE SNELHEID
Bijlage	E	SNELHEIDSTOMOGRAMMEN VAN VERSCHILLENDE FREQUENTIE- KLASSEN
Bijlage	F	AMPLITUDE TOMOGRAM
Bijlage	G	RESULTAAT VAN DE SNELHEIDSTOMOGRAMMEN NA CLUSTER ANALYSE
Bijlage	H	FOTOS VAN DE APPARATUUR EN DE P- EN S-BRON

SAMENVATTING

Onderzoek naar de toepassingsmogelijkheden van seismische tomografie voor de bepaling van de doorlatendheid van de ondergrond

In het kader van NOBIS (Nederlands Onderzoeksprogramma Biotechnologische In-situ Sanering) is het project "Onderzoek naar de toepassingsmogelijkheden van seismische tomografie voor de bepaling van de doorlatendheid van de ondergrond" uitgevoerd door de RGD (Rijks Geologische Dienst) met medewerking van WMN (Waterleidingbedrijf Midden-Nederland).

Uit een inventarisatie van NOBIS blijkt dat bij biotechnologische in situ sanering een gedetailleerd beeld van de heterogeniteit van de ondergrond noodzakelijk is.

Het doel van dit project is het onderzoeken van de mogelijkheden die seismische tomografie kan bieden voor de bepaling van de heterogeniteit van de ondergronden, met name voor de lithologie en de doorlatendheid.

Het studiegebied waarin seismische cross-borehole metingen zijn verricht, ligt nabij het waterwinstation Linschoten van WMN. Op ongeveer 1,5 km afstand van het waterwinstation bevindt zich de voormalige stortplaats Mastwijk. Uit grondwateranalyses is gebleken dat er inmiddels vervuiling is opgetreden onder de Formatie van Kedichem. Boven en onder de Formatie van Kedichem bevinden zich respectievelijk de goed doorlatende vlechtende rivierafzettingen van de Formatie van Sterksel en de Formatie van Harderwijk.

Voor WMN is de heterogeniteit van de Formatie van Kedichem van groot belang om vast te kunnen stellen in hoeverre de heterogeniteit het lek vanaf de stortplaats naar het tweede watervoerende pakket (de Formatie van Harderwijk) kan verklaren.

Als onderdeel van het onderzoek naar dit probleem zijn 2 boringen gezet op 30 m afstand van elkaar, waartussen een seismisch tomografische opname is verricht.

Uit een parallel gelijktijdig opgestarte regionale studie [Storms, 1996] is gebleken dat de Formatie van Kedichem kan worden opgedeeld in vier sequenties, respectievelijk:

- sequentie I: een overgang van de onderliggende vlechtende rivierafzetting van Harderwijk naar een meanderende rivierafzetting;
- sequentie II een lateraal uitgestrekte komklei;
- sequentie III een siltige anastomoserende rivierafzetting;
- sequentie IV een lateraal uitgestrekte komklei.

Met behulp van steekmonsters, verticale doorlatendheidsmetingen, seismische snelheidstomogrammen en seismische dempingstomogrammen is een tweedimensionale lithologische sectie en een doorlatendheidssectie van de ondergrond gemaakt.

Met behulp van een dempingstomogram is het mogelijk kleien van zanden te onderscheiden. Een snelheidstomogram maakt het mogelijk silten, fijne zanden en grove zanden te onderscheiden. Van de vlechtende rivierafzettingen zijn zelfs grofzandige geulen en kleine kleilagen te onderscheiden. Voor de doorlatendheid van de 2D-sectie worden voor de kleien en de siltige afzettingen de gemeten verticale laboratoriumwaarden gebruikt. Voor de zandige afzettingen kan met behulp van de theorie van Biot de horizontale doorlatendheid rechtstreeks uit de snelheidstomogrammen worden

SUMMARY

Applicability of seismic tomography for the determination of the permeability of the subsurface

In the framework of NOBIS (Dutch Research Programme In-situ Bioremediation) a study to the applicabilities of seismic tomography has been carried out by the RGD (Rijks Geologische Dienst) in cooperation with WMN (Waterleidingbedrijf Midden-Nederland).

A previous inventory study to in-situ bio-remediation by NOBIS indicated that detailed information about the heterogeneity of the subsurface is a prerequisite.

The aim of this study is to evaluate the possibilities of seismic tomography to characterize the heterogeneity of the subsurface, in particular lithology and permeability.

The study area for seismic cross-borehole measurements is situated near the drinkwater pump-station Linschoten of WMN. At about 1.5 km distance of the water pump-station the former rubbish-dump Mastwijk is located. Analyses of groundwater extracted below the Kedichem Formation (an aquitard) revealed significant groundwater contamination. Seismic tomography has been used to study the heterogeneity of the Kedichem Formation, which is believed to cause the contaminated groundwater to flow through and below the aquitard.

At a distance of 30 metres two observation wells have been drilled. In between these wells a cross-borehole seismic survey has been made. A two dimensional lithological section and permeability section of the Kedichem Formation have been derived from core samples, permeability measurements, seismic velocity tomograms and seismic attenuation tomograms.

Clays and sands can be distinguished from attenuation tomograms. From velocity tomograms silts, fine sands and course sands can be distinguished. Channels filled with course sands can be recognized as well as locally distributed small clay layers.

With the Biot theory the horizontal permeability of sandy deposits can directly be derived from the velocity tomograms. The permeability of clays and silts is based on laboratory measur

HOOFDSTUK 1

INLEIDING

In het kader van NOBIS (Nederlands Onderzoeksprogramma Biotechnologische In-situ Sanering) werd het project "Onderzoek naar de toepassingsmogelijkheden van seismische tomografie voor de bepaling van de doorlatendheid van de ondergrond" uitgevoerd door de RGD (Rijks Geologische Dienst) met medewerking van WMN (Waterleidingbedrijf Midden-Nederland).

Het Nederlands Onderzoeksprogramma Biotechnologische In-situ Sanering heeft een inventarisatie van de knelpunten, die optreden bij implementatie van biotechnologische in situ sanering, laten maken. Uit deze inventarisatie komt onder andere naar voren dat er een gebrek bestaat aan methodieken voor het karakteriseren van de heterogeniteit van de ondergrond. Het ontwikkelen van deze technieken wordt als urgent beschouwd, omdat bij toepassing van in situ sanering de opbouw van de ondergrond medebepalend is voor het slagen van de in situ sanering. In tegenstelling tot ex situ behandeling van verontreinigde grond kan bij in situ sanering geen scheiding van grondfracties plaatshebben. Bij in situ sanering zal het ontwerp van het saneringssysteem dus moeten worden afgestemd op zowel de verbreiding van de verontreiniging als op de opbouw van de ondergrond.

Bij de overgrote meerderheid van de in situ saneringen, en evenzo bij biotechnologische in situ sanering, wordt de grond actief doorstroomd met een vloeistof of gas. Gegeven het feit dat de grond een heterogeen medium is, zal de vloeistof- of gasstroom niet alle delen van de grond met dezelfde intensiteit doorstromen. Hierdoor kan het voorkomen dat aan het einde van een sanering de verontreiniging slechts ten dele is verwijderd. Feitelijk is dit een van de meest voorkomende redenen van het (deels) mislukken van (biotechnologische) in situ sanering. De ontwikkeling van biotechnologische in situ sanering zou dus bijzonder baat hebben bij het beschikbaar komen van een methodiek waarmee op voorhand met voldoende nauwkeurigheid inzicht kan worden verkregen in de opbouw van de ondergrond, zowel waar het de lithologie (zand/klei/veen) als waar het de hydraulische doorlatendheid betreft. Uit bedrijfseconomisch oogpunt biedt een betrouwbare methodiek voor het karakteriseren van de heterogeniteit van de ondergrond de volgende voordelen:

1. Door het adequaat beschrijven van de heterogeniteit van de ondergrond kan het ontwerp van een biotechnologisch in situ saneringssysteem worden afgestemd op de eisen die de ondergrond stelt. Met andere woorden "taylor made" in plaats van "confectie".
2. De grootste schadepost betreffende het falen van een sanering wordt meestal gevormd in het natraject van de sanering. In deze fase is de sanering reeds enige tijd in gang gezet zonder het gewenste resultaat. Additionele maatregelen moeten worden genomen. Behalve dat deze maatregelen niet begroot zijn, is het ook zo dat in het oorspronkelijke saneringsontwerp geen rekening is gehouden met deze maatregelen. Als gevolg hiervan wordt de uiteindelijke sanering suboptimaal uitgevoerd. Een betrouwbaar beeld van de ondergrond vooraf kan deze risico's voorkomen.

Voor het vaststellen van de heterogeniteit van de ondergrond ten behoeve van het ontwerp van een saneringssysteem kunnen twee benaderingen worden onderscheiden:

1. Directe methode - dat wil zeggen door middel van het plaatsen van een aantal boringen worden monsters van de ondergrond verkregen die vervolgens op lithologische eigenschappen kunnen worden geïnterpoleerd en kunnen worden getest op hydrogeologische, geotechnische en/of bodemchemische kenmerken. Tussen de boorpunten worden de lithologie en de verschillende eigenschappen die daarmee samenhangen geïnterpoleerd.
2. Indirecte methode - dat wil zeggen met behulp van geofysische oppervlaktemetingen (seismiek/EM/radar) wordt een continu beeld van een geofysische eigenschap van de ondergrond verkregen op basis waarvan de lithologie kan worden afgeleid.

Aan beide methoden kleven nadelen. Bij een verkenning van de ondergrond op basis van boringen is feitelijk alleen informatie beschikbaar op de boorpunten. De tussenliggende lithologie en daarmee samenhangende kenmerken wordt geïnterpoleerd. Hierdoor blijft onzekerheid over de heterogene opbouw van de ondergrond bestaan. Deze onzekerheid kan worden gereduceerd door meer boringen te plaatsen, maar de kosten hiervoor zijn navenant. De indirecte methode levert wel een continu beeld van de opbouw van de ondergrond. Dit beeld moet echter worden afgeleid uit geofysische parameters

die bij geen van de gebruikte methoden eenduidig zijn gerelateerd aan de lithologie. Bovendien komt er geen informatie beschikbaar uit de grootte van specifieke hydrogeologische, geotechnische en/of bodemchemische parameters die voor een saneringsontwerp van belang zijn. Deze moeten weer op basis van de geofysisch afgeleide lithologie worden geschat. Om deze reden worden geofysische metingen vrijwel altijd gecombineerd met boringen.

In dit project wordt nader ingegaan op een nieuwe methode, waarmee zowel een continu beeld van de lithologie van de ondergrond kan worden verkregen als de continue verdeling van de hydraulische doorlatendheid van de ondergrond kan worden vastgesteld. Deze methode, seismische tomografie, is afkomstig uit de exploratie geofysica en is momenteel binnen een aantal geotechnische projecten op toepassingsmogelijkheden voor het verkennen van de ondiepe ondergrond onderzocht. De methode combineert de voordelen van een continu beeld van de lithologie van de ondergrond met directe metingen van de hydraulische doorlatendheid van de ondergrond, zodat een betrouwbaarder beeld van de heterogeniteit van de ondergrond en de verdeling van de hydraulische doorlatendheid wordt verkregen dan op basis van de hiervoor beschreven methoden mogelijk is. Het doel van het project is om seismische tomografie onder veldomstandigheden te testen en inzicht te geven in de mogelijkheden die deze methode biedt bij het beschrijven van de heterogeniteit en hydraulische doorlatendheid van de ondergrond.

De locatie waar het onderzoek is verricht, bevindt zich nabij Linschoten in de provincie Utrecht. Op ongeveer 1,5 km van elkaar bevinden zich hier de voormalige vuilstort Mastwijk en het pompstation Linschoten van WMIN. In een controleput, die tussen het pompstation en de vuilstort ligt, is een vervuiling aangetroffen die afkomstig is van de vuilstort en in de toekomst een bedreiging vormt voor de kwaliteit van het te onttrekken drinkwater. Uit grondwateranalyses is gebleken dat het vervuillingsfront zich drie keer sneller door de slechtdoorlatende laag van de Formatie van Kedichem heeft verplaatst dan was voorspeld met behulp van het grondwatermodel van WMIN. Dit betekent dat de Formatie van Kedichem lokaal afwezig of beter doorlatend is dan voorheen werd aang

Aan de hand van lithologische boorbeschrijvingen, geofysische boorgatmetingen, hydraulische doorlatendheidsmetingen, steekmonsters en seismische cross-hole metingen van de Formatie van Kedichem is een lithologisch model en een doorlatendheidsmodel gemaakt van de onc

HOOFDSTUK 2

THEORIE

2.1 Principes van de seismische tomografie

Seismische tomografie is een geofysische methode voor het in kaart brengen van de lithologie en geologische structuren in de ondergrond. De term tomografie is afgeleid van het Griekse woord "tome", hetgeen doorsnede betekent. De methode komt uit de geneeskunde waar deze met succes wordt toegepast (zie fig. 1).

Fig. 1. Toepassing van de tomografie in de geneeskunde.

De laatste jaren wordt tomografie ook in de exploratie geofysica (met name voor olie en gas) en de civiele techniek (Belgie, Duitsland en Zweden) toegepast.

In figuur 2 is schematisch de meetopstelling weergegeven voor seismische tomografie. Bij de methode wordt gebruik gemaakt van een seismische bron in één boorgat en een streng ontvangers in een tweede boorgat op enige afstand van de bron.

Fig. 2. Schematische weergave van een cross-hole seismische meting.

Met de seismische bron kunnen seismische golven worden opgewekt die door de specifieke opbouw van de ondergrond op laagscheidingen tussen verschillende lithologische eenheden (b.v. zand-klei) afbuigen of breken. De aankomsttijd van de seismische golven wordt gemeten door de streng ontvangers. Door op verschillende diepten een seismisch signaal uit te zenden, worden door de ontvangers verschillende aankomsttijden van de golven gemeten. Door de configuratie van bron en ontvanger te variëren, kunnen verschillende opnamen worden gemaakt.

Om een tomografisch beeld te creëren, wordt de cross-hole sectie verdeeld in een aantal gridcellen, waarin de te bepalen parameter (snelheid of demping) constant wordt verondersteld.

De lijnintegraal van een geluidsgolfpad is:

$$t = \int_r \frac{dr}{v(x, y)} \quad (1)$$

waarin:

- $v(x, y)$ is de snelheid;
- r is het golfpad;
- t is de eerste aankomsttijd.

Na vertaling voor de gridcellen wordt dit:

$$t_k = \sum_i S_i \cdot r_{ik} \quad (2)$$

waarin:

- t_k is de reistijd van golf k ;
- I is het aantal cellen waar de golf doorheen gaat;
- S_i is de slowness (inverse van v in cel i);
- r_{ik} is de lengte van het golfpad k door cel i .

Vergelijking (2) is een stelsel van vergelijkingen wat in matrixnotitie kan worden gesch

$$T = RS \quad \text{met} \quad S = KT \quad \text{als oplossing}$$

waarin:

- T is de vector van reistijden;
- S is de vector van slowness;
- R is de matrix van lengte van golfpaden;
- K is de inverse van R .

In dit rapport wordt voornamelijk gewerkt met de "damping least squares" methode [Stewart, 1993]. Dit is een methode die in eerste instantie gebruik maakt van een geschat snelheidsmodel, waarvan de eerste aankomsttijden (t_{ca}^i) worden worden. Vervolgens worden de geschatte modelsnelheden veranderd, zodanig dat met behulp van de least squares methode r_i tot nul nadert.

$$r_i = t_{obs}^i - t_{cal}^i$$

waarin:

- $i = 1; \dots, N$
- N en t_{obs}^i zijn de gemeten eerste aankomsttijden.

Om in geval van ruis op de meetresultaten toch een stabiele oplossing te krijgen, wordt er bij de techniek gewerkt met een dempingsfactor.

Een meer gedetailleerde beschrijving is te vinden in het boek "Exploration seismic tomography: Fundamentals" [Stewart, 1993].

2.2 Relatie tussen de hydraulische doorlatendheid en de snelheid

De relatie tussen de golfsnelheden van het seismisch signaal enerzijds en de permeabiliteit en porositeit van zandkorrels anderzijds kan worden afgeleid aan de hand van de theorie van Biot [Bourbie et al., 1987]. Het seismische signaal is een optelsom van verschillende seismische frequenties. Als er een seismisch signaal door een poreus medium gaat, beïnvloedt de heterogeniteit van dit medium het signaal. De invloed van de permeabiliteit op de snelheid is voor elke frequentie anders (zie fig. 3 [Dijkshoorn, 1991]).

Fig. 3. Relatie tussen frequentie van het seismisch signaal en de permeabiliteit van het poreuze medium [Dijkshoorn, 1991].

In figuur 3 geldt dat de kritische frequentie f_c is de grenswaarde is waarboven de snelheid constant blijft [Keller, 1989].

$$f_c = \frac{\alpha \phi \eta}{\pi \left(\frac{1}{\phi} + 1 \right) K_0 \rho_f}$$

waarin:

ϕ is de porositeit;

K_0 is de permeabiliteit;

η is de viscositeit van water (0,0013 Pa.s);

ρ_f is de dichtheid van water (1000 kg/m³).

Als we ervan uitgaan dat de invloed van de porositeit, indien gelegen tussen 0,25 en 0,40, een te verwaarlozen invloed heeft op de kritische frequentie ten opzichte van de invloed van de permeabiliteit op de kritische frequentie kunnen we de permeabiliteit berekenen als de kritische frequentie bekend is.

In figuur 4 zijn de curven weergegeven van de snelheid en de demping van het signaal door silt, matig grof zand en zeer grof zand voor mariene afzettingen [Turgot, 1988].

Fig. 4. Snelheid en demping voor een (a) silt, (b) matig grof zand, (c) zeer grof zand en (d) een poreus gesteente [Turgot, 1988].

Uit figuur 4 zijn waarden voor snelheid en demping af te leiden die zijn weergegeven in

Tabel 1. Waarden voor snelheid en demping.

	silt	matig grof zand	zeer grof zand
snelheid (m/s)	1550 - 1600	1650 - 1750	1800 - 1900
demping	10^{-4} - 10^{-3}	10^{-2} - 10^{-1}	10^{-2} - 10^{-1}

De invloed van kleimineralen op de vorm van de curve is onbekend aangezien het model van Biot is gebaseerd op ronde zandkorrels en geen rekening houdt met de invloed van kleimineralen.

Als de seismische bron een groot frequentiebereik heeft, van ± 40 Hz tot een paar kHz, kan het seismische signaal worden gefilterd voor verschillende frequentieranges. Voor iedere frequentie wordt de golfsnelheid van het seismisch signaal bepaald. De golfsnelheden van het samengestelde seismische signaal kunnen worden uitgezet tegen de frequentie. Aan de hand van deze relatie kan de permeabiliteit van het medium worden afgeleid.

In ongeconsolideerd materiaal ontstaat er door de voortplanting van de seismische golf een relatieve beweging van de vloeistof ten opzichte van het korrelskelet en treedt er door wrijving energieverlies van het signaal op. Dit betekent dat met de huidige beschikbare bronnen voor ondiepe boorgatseismiek de maximum meetafstand tussen bron en ontvanger in ongeconsolideerd materiaal relatief kleiner is dan in vast gesteente. Bij een grotere afstand is het niet mogelijk een signaal te ontvangen. In vast gesteente is een afstand tussen bron en ontvanger van meer dan 300 m mogelijk.

2.3 Cluster analyse van de snelheidstomogrammen

Van elke frequentieklasse wordt een snelheidstomogram gemaakt. Hierdoor zal er voor elke gridcel een relatie bestaan tussen snelheid en frequentie [Keller, 1989]. De relatiecurven worden benaderd met de functie;

$$V = A_0(1 - \exp(-1,8 \cdot \text{freq}/A_1)) + A_2 \quad (4)$$

waarbij A_0 , A_1 en A_2 worden benaderd met de kleinste kwadratenmethode. A_0 is de snelheid bij frequentie 0, $A_2 - A_0$ is de maximum snelheid bij de frequentie groter dan de kritische frequentie en A_1 is de kritische frequentie, waaruit de permeabiliteit kan worden geschat. Met cluster analyse (de K-mean methode [Norusis, 1992]) worden de verschillende curven ingedeeld in clusters van grote gelijkens. Deze clusters kunnen na correlatie met de doorlatendheidsmetingen en de lithologische beschrijving worden vertaald naar doorlatendheidsclusters en litholog

2.4 Flowdiagram van de methode

HOOFDSTUK 3

WERKWIJZE

Allereerst is op regionale schaal de geologie van de ondergrond geëvalueerd. Dit is uitgevoerd met behulp van bestaande pulsboorgegevens uit de RGD-database en gamma logs van VMIN. Vervolgens is aan de hand van steekboringen, doorlatendheidsmetingen, P- en S-suspension logs en de cross-borehole metingen de geologie tussen de boringen 43 en 44 lokaal onderzocht. Hieronder volgt een opsomming van alle gegevens die zijn gebruikt voor de latere interpretatie.

3.1 Regionaal

Figuur 5 toont de locatie van het onderzoeksgebied met daarin de boringen en de vuil:

Fig. 5. Locatiekaart van alle boringen met pulsmonsters en waarnemingsputten (wp) met gamma logs.

3.1.1 Pulsmonsters van boringen

Pulsmonsters zijn monsters die geroerd aan het oppervlak komen en waarmee op meterschaal een grove indicatie van de lithologische opbouw kan worden gegeven.

Kleinschalige lithologische afwisselingen of geleidelijke overgangen zullen meestal niet als zodanig worden herkend.

De pulsmonsters van de boringen 43 en 44 zijn beschreven volgens de SBB (Standaard BoorBeschrijving) van de RGD (zie bijlage A1 en A2).

In een straal van +/- 25 km rondom de vuilstort staan ongeveer 37 boringen die de Formatie van Kedichem doorsnijden. Met behulp van deze boringen is een supra-regionale kaart gemaakt van de top van deze Formatie (zie 4.2, fig. 9).

3.1.2 *Gamma logs*

Het gamma log is een weergave van de hoeveelheid natuurlijke gammastraling die wordt uitgezonden door de sedimenten. De natuurlijke gammastraling van de kleifractie is groter dan van de zandfractie. Een grote uitslag op de log komt overeen met een hoog percentage kleideeltjes. Zowel geleidelijke overgangen als scherpe, erosieve grenzen tussen klei en zand zijn duidelijk herkenbaar. Veer en humeus materiaal laten een lage uitslag op de log zien vanwege het hoge percentage organisch materiaal. Er zijn gamma logs beschikbaar van 19 boringen die verspreid liggen over een gebied van 4 km² (zie fig. 5).

De gamma logs van de boringen 43 en 44 zijn afgebeeld in bijlage B1 en B2.

3.2 **Lokaal**

Lokaal is binnen het traject van 40 - 80 m diepte NAP (Formatie van Kedichem) in groot detail gekeken naar de lithologie, geologie en doorlatendheid van en tussen de boringen 43 en 44 (zie

3.2.1 *Steekmonsters van boringen*

In de boorgaten 43 en 44 zijn steekmonsters gestoken op vaste intervallen van 2 m.

In boring 43 zijn steekmonsters van 30 cm lengte en 6 cm doorsnede genomen. In boring 44 zijn steekmonsters van 1 m genomen met een doorsnede van 10 cm. Met uitzondering van enkele verstoringen bleek het merendeel van de steekmonsters van zodanige kwaliteit te zijn dat de oorspronkelijke sedimentaire structuur nog goed te herkennen was.

Van verschillende steekmonsters is de korrelgrootteverdeling en het lutumgehalte bepaald. Deze laatste zijn uitgevoerd met de pipetmethode.

3.2.2 *Hydraulische doorlatendheidsmetingen*

Van de steekmonsters is de doorlatendheid bepaald (zie bijlage B1 en B2). De doorlatendheid van de zandige monsters is met de "constant head methode" gemeten. De doorlatendheid van de kleiige monsters is met behulp van een "flexible wall" permeabiliteitsmeter bepaald [Daniel et al., 1984]. Bij deze permeabiliteitsmeter wordt, door middel van een gecreëerd drukverschil, een stijghoogte van meerdere meters op het kleimonster gezet om de stroomsnelheid van het water door het kleimonster te versnellen. Lekkage langs de wanden wordt voorkomen door het monster in een latex hoes te plaatsen, waarna deze in een glazen vat onder druk wordt gezet. Het verschil tussen de zijdelingse druk en het verticaal drukverschil bedraagt maximaal 0,5 bar om het dichtklappen of uitvloeien van de klei te voorkomen. De gemeten doorlatendheid is gecorrigeerd voor een temperatuur van 10 °C.

Omdat de kwaliteit van sommige steekmonsters te wensen overliet, zijn enkele monsters niet benut om permeabiliteitsmetingen op uit te voeren. In bijlage B1 en B2 zijn de resultaten weergegeven van de doorlatendheidsmetingen voor de kwalitatief betere steekmonsters.

De doorlatendheidsmetingen hebben aangetoond dat de kleien zeer slecht doorlatend zijn ($K = 0,2 \cdot 10^{-4} - 0,5 \cdot 10^{-4}$ m/d).

3.2.3 *P- en S-suspension log*

Met de P- en S-suspension sonde zijn de verticale P-snelheden (longitudinale) en verticale S-snelheden (transversale) gemeten (zie bijlage C1 en C2). Deze metingen zijn steeds gemiddelde snelheidswaarden van 1 m langs de boorgatwand. Vereisten zijn een PVC-casing en een boorgatdiameter van 6,5 - 10 cm. Wanneer we het gamma log en het P-suspension log met elkaar vergelijken, geeft het P-suspension log een verhoging van de snelheid in de kleien en een verlaging in snelheid voor de siltige kleien. De S-snelheden van de S-suspension log zijn niet zo nauwkeurig, aangezien deze golven sterk worden verstoord door "Stoney waves" [Tang, 1995]. De resultaten zijn moeilijk te koppelen aan de lithologie. Er kan slechts worden geconstateerd dat de S-snelheid in de grovere zand- en grindafzettingen sterk varieert en in de fijnere klei- en leemafzettingen een constanter karakter heeft.

De gevonden relatie tussen de P-golf en de lithologie sluit nauw aan bij de theorie van Marion en Turgut [Marion, 1992; Turgut, 1988]. Volgens de theorie van Turgut hebben grovere zanden een hogere snelheid dan silten en fijne zanden. Als in een zandige of siltige afzetting meer dan 8 % kleimineralen zitten, is de benaming van deze afzetting volgens SBB NEN-klei. Volgens de theorie en laboratoriummetingen van Marion hebben deze klei-afzettingen met gemengde lithologien, bestaande uit zand en kleimineralen, een variërende snelheid die wordt bepaald door het percentage kleimineralen. Als het percentage kleimineralen lager is dan de porositeit van het zand zullen de kleimineralen de zandporiën

(30 - 40 %) opvullen. Dit verkleint de totale porositeit, waardoor de snelheid oploopt. Als het percentage kleimineralen hoger is dan de porositeit van zand zullen de zandkorrels zweven in een kleiige matrix. Hierdoor verandert de frame bulk modulus, waardoor de snelheid weer afneemt. Het is echter zo dat in Nederland de meeste rivierkleien ongeveer 30 - 40 % kleimineralen bevatten, hetgeen een snelheidspiek veroorzaakt.

3.2.4 *Seismische cross-hole metingen*

Voor de seismische cross-hole metingen is de volgende apparatuur gebruikt:

- 12 hydrofoons met onderlinge afstand 1 m (ontvangers);
- 1, 3 componenten gefoon (S-golfontvanger);
- 1 sparker (de P-bron);
- 1 shear wave hamer (de S-bron);
- DMT Summit seismograaf (opname-apparatuur).

Technische eisen:

- hydrofoons (PVC-casing + minimale diameter 6,5 cm);
- 3 componenten gefoon (minimale diameter 6 cm);
- 1 sparker met veel energie en een hoge frequentie > 1000 Hz (minimale diameter 10 cm);
- 1 sheare wave hamer (minimaal 8 cm diameter);
- seismograaf (minimum sample rate van 1/32 msec).

De P-golfmetingen zijn gemeten met een broninterval van 1 m in boring 44 (traject 40 tot 83 m) en een interval van 1 m tussen de ontvangers in boring 43 (traject 40 tot 90 m) (zie fig. 6). Voor de S-golfmetingen is er alleen lateraal gemeten met een interval van 1 m.

De metingen opgenomen met de P-bron (de sparker, zie bijlage H) hebben een aankomstsignaal van zeer goede kwaliteit. Het aankomstsignaal heeft genoeg energie om de boorgaten in de toekomst verder uit elkaar te zetten zonder de kwaliteit te verminderen.

De metingen opgenomen met de S-bron (de shear wave hamer, zie bijlage H) bevatten veel minder energie.

Fig. 6. Bedekkingsgraad van de seismische cross-hole metingen.

Bij het vergelijken van de P-suspension log (verticale snelheden) en de gemeten laterale P-snelheden blijkt dat de verticale snelheden, lager zijn dan de laterale snelheden. De snelheid is dus anisotroop. Een verklaring hiervoor is de heterogeniteit in verticale richting van de afzettingen. Net zoals bij de P-suspension log laten de laterale P-metingen respectievelijk een verhoging van de snelheid in de kleien en een verlaging in snelheid voor de siltige afzettingen zien. In figuur 7 zijn de P-golfaankomstsignalen afgebeeld van alle ontvangers in boring 43 met een bron op 66 m diepte in boorgat 44.

Figuur 7: Aankomsttijden in boring 43 met een bron op 66 m diepte in boorgat 44.

3.2.5 Snelheids- en dempingstomogrammen

Als inversiemethode is gekozen voor de "damping least squares" methode [Stewart, 1993], omdat bij deze methode het meest rekening wordt gehouden met de heterogeniteit. We hebben te maken met een anisotropie in de snelheid (zie 3.2.2). De inversiemethode, die wordt beschreven in 2.1, gaat er echter van uit dat de snelheid van elk gridblok isotroop is. Om de gevolgen hiervan te evalueren, zijn drie tomogrammen op verschillende wijze berekend (zie bijlage D), waarbij steeds minder rekening is gehouden met de golfpaden die een sterke invloed hebben van de verticale snelheid.

Er blijkt dat als alle signalen worden gebruikt het tomogram een lagere snelheid (de verticale snelheid) aanneemt, daar waar zich veel golfpaden bevinden met een verticale component (in het midden en in de hoeken van het tomogram). Aan de randen, waar minder paden lopen en verhoudingsgewijs meer laterale paden voorkomen, moeten de snelheden dan extreem hoog worden aangepast om aan de laterale aankomsttijden te voldoen.

Het onderste tomogram van bijlage D maakt geen gebruik van de golfpaden met een grote verticale component, waardoor het snelheidstomogram alleen de laterale snelheden weergeeft. Daarom is gekozen voor deze laatste methode van inverteren.

Op alle signalen zijn low bandpass frequentiefilters toegepast, met de volgende frequentiefilters: 5000 Hz, 2000 Hz, 1000 Hz, 750 Hz, 500 Hz en 300 Hz.

Daarna zijn de eerste aankomsttijden van de signalen per frequentieklasse bepaald (zie

Fig. 8. Aankomsttijden van een signaal voor verschillende frequentieranges.

Per frequentieklasse is vervolgens een snelheidstomogram gemaakt (zie bijlage E). De twee kleilagen lijken op ieder tomogram continu voor te komen met een hoge laterale snelheid. Ook de lage snelheidslaag, die correspondeert met de siltige afzettingen, is vrijwel overal aanwezig. Opvallend is dat de snelheid van het hele tomogram relatief lager wordt naarmate het frequentiefilter lager wordt. Dit komt overeen met de theorie van Biot (zie 2.2).

Van de amplitude van de signalen is een dempingstomogram gemaakt (zie bijlage F).

HOOFDSTUK 4

INTERPRETATIE

Allereerst zullen we een geologische interpretatie geven van het regionale gebied. Dit geeft meer inzicht in het type rivierafzettingen, hetgeen de randvoorwaarde geeft voor de lokale lithologische opbouw waar we in het tweede deel dieper op ingaan.

4.1 Regionale geologische interpretatie

Hieronder volgt een opsomming van de Holocene en Pleistocene afzettingen, zoals deze in het studiegebied worden aangetroffen. Deze interpretatie is gebaseerd op de pulsmonsters en gamma logs van boringen in de regio.

4.1.1 Holocene afzettingen

Betuwe Formatie

Het huidige landschap is gevormd door Holocene rivierafzettingen, behorende tot de Betuwe Formatie. De Oude Rijn en de Hollandse IJssel zijn de twee meest recente stroomgordels die rondom het onderzoeksgebied aanwezig zijn. Beide zijn meanderende riviersystemen die tot aan de bedijking (omstreeks de 12^e eeuw) materiaal in het gebied hebben afgezet.

De fluviatiele afzettingen van de Oude Rijn en de Hollandse IJssel kunnen in vier lithogenetische eenheden worden onderverdeeld, te weten: bedding-, oever-, kom- en crevasse-afzettingen. De beddingafzettingen bestaan uit zand met sporadisch grind en zijn ingesneden in de onderliggende afzettingen. De breedte van de beddingafzettingen is in de orde van grootte van ongeveer 0,5 - 1 km. Oeverafzettingen worden aan beide kanten naast de beddingafzettingen aangetroffen. Ze bestaan uit siltig materiaal met kleiige en zandige inschakelingen. De oeverafzettingen laten een afname in de korrelgrootte zien in de richting van de komgebieden. Komafzettingen bestaan uit kleien, afgewisseld met veen en humeuze kleien. Bij een lage sedimentatiesnelheid van de komafzettingen worden humeuze of venige kleien afgezet. Wanneer de toevoer van klastisch materiaal in de komgebieden zeer klein is, met andere woorden, wanneer de invloed van een actieve stroomgordel afwezig is, ontstaat er veen. De laterale faciësverandering plus het verschil in zetting en compactie tussen de oeverafzettingen en de komafzettingen, veroorzaakt reliëf in het landschap. Het maximale hoogteverschil bedraagt ongeveer 1 m. Crevasse-afzettingen ontstaan tijdens hoogwater wanneer een insnijding in de oeverwal plaatsheeft. In eerste instantie ontstaat er een waaivormige afzetting achter de oeverwal, bestaande uit siltig en zandig materiaal. Vervolgens kan een geultje ontstaan, dat meestal alleen tijdens hoogwater actief is en doodloopt in de richting van de kom. Crevasse-afzettingen bestaan uit een vaak sterk gelamineerde afwisseling van zand, silt en klei. Ze worden meestal gerekend tot de oeverafzettingen. De Betuwe Formatie kan, vanwege de grote hoeveelheid komafzettingen, worden beschouwd als de eerste hydrologisch slechtdoorlatende laag.

4.1.2 Pleistocene afzettingen

Formatie van Kreftenheye

De Formatie van Kreftenheye bestaat uit overwegend grove, grindhoudende zanden. Op enkele plaatsen kunnen dunne klei- of veenlaagjes voorkomen [Zagwijn en Van Staalduinen, 1975]. Tot de Formatie van Kreftenheye behoren afzettingen van het vlechtend Rijn-Maas-systeem en bijbehorende genetisch samenhangende afzettingen, zoals donken. De sedimentatie heeft plaatsgehad vanaf en tijdens de maximale landijsuitbreiding van het Saalien tot aan het Holoceen. De dikte van de Formatie van Kreftenheye in het onderzoeksgebied ligt rond de 20 à 25 m.

Formatie van Sterksel

De Formatie van Sterksel bestaat eveneens uit grove, grindhoudende zanden. Kleizen komen slechts zeer plaatselijk voor. Tot de Formatie van Sterksel behoren wederom afzettingen van het vlechtend Rijn-Maas-systeem. De dikte van de Formatie van Sterksel ligt in de orde van grootte van 25 m. De top van de Formatie van Sterksel is over het algemeen fijner ontwikkeld dan de basis, dat een hoog grindpercentage kent.

Formatie van Kedichem

De top van de Formatie van Kedichem bestaat uit een kleiige laag, afgezet door het Rijn-Maas-systeem. De totale dikte van de Formatie van Kedichem varieert tussen ongeveer 20 en 25 m. De Formatie van Kedichem kan worden onderverdeeld in vier sequenties, die lithologisch variëren tussen klei, veen, silt en fijn zand.

Tussen de periode van afzetting van de Formatie van Sterksel en de Formatie van Kedichem bevindt zich een tijdshiaat. De top van de Formatie van Kedichem is een erosie-oppervlak, waarop gedurende zeer geruime tijd geen sedimentatie heeft plaatsgehad. Op verschillende plaatsen zijn geulinsnijdingen aangetroffen in de top van de Formatie van Kedichem.

Om een beeld te krijgen van de richting van het globale erosievlak aan de top van de Formatie van Kedichem is een contourkaart gemaakt. Figuur 9 bevat de contourkaart van de top van de Formatie van Kedichem, die gemaakt is door middel van het gewogen gemiddelde.

Fig. 9. Contourkaart van de diepte (cm) van de top van de Formatie van Kedichem in en rondom het onderzoeksgebied met op de assen de x- en y-coördinaat (zie fig. 4, boringen +)

Rondom het studiegebied is een gebied van 32 bij 32 km geselecteerd om inzicht te krijgen in de grootschalige verspreiding van de Formatie van Kedichem. Uit het boorputtenarchief van de RGD zijn alle boringen in het gebied met een stratigrafie geselecteerd. Aan de hand van deze boringen is de contourprocedure uitgevoerd. In het gebied zijn twee kleine noordwest-zuidoost lopende breuken aanwezig. Deze breuken zijn niet in de contourkaart opgenomen, omdat uit de boringen is gebleken dat er nagenoeg geen verzet langs de breukvlakken heeft plaatsgehad. Uit de contourkaart van de top van de Formatie van Kedichem blijkt dat er een 5 tot 10 km breed dal van zuidoost naar noordwest door het gebied loopt. Dit dal vormt een vlakte waar vlechtende rivieren hebben gestroomd, die de top van de Formatie van Kedichem hebben geërodeerd.

Fig. 10. Natuurlijke gamma log met de onderverdeling van de Formatie van Kedichem in vier sequenties.

Globaal kan de Formatie van Kedichem in vier sequenties worden gesplitst (zie fig. 10). Deze vier sequenties zijn in alle gamma logs te vervolgen en hebben een grote laterale verspreiding. Sequentie I ligt op de overgang van de Formatie van Harderwijk met de Formatie van Kedichem en laat een geleidelijke toename van de kleifractie zien. Sequentie II is een kleipakket, bestaande uit massieve grijze kleien. Sequentie III bestaat uit een lithologisch sterk wisselend pakket. In het oosten van het studiegebied zijn de afzettingen overwegend siltig met dunne zandige en kleiige inschakelingen. Verder naar het westen wordt het pakket kleiiger en de variatie groter. De mate van humeusiteit verschilt sterk en er is veel ingespoeld plantenmateriaal aanwezig. Sequentie IV is een dik massief pakket bestaande uit grijze kleien. Boven sequentie IV komt soms nog een kleipakket voor van enkele decimeters dikte. De laag tussen deze dunne kleilaag en het kleipakket uit sequentie IV bestaat uit grof zand met grind. Daarom is het niet waarschijnlijk dat dit kleipakketje behoort tot de Formatie van Kedichem. De diepte van de verschillende sequenties in het gebied is nagenoeg constant, zoals kan worden afgeleid uit de logs. Omdat de laterale verspreiding van sequentie I, II, III en de basis van IV haast geen hoogteverschillen laten zien, moeten de hoogteverschillen in de top van sequentie IV een gevolg zijn van erosie. Uit de contourkaart van de Formatie van Kedichem (zie fig. 9) blijkt dat het studiegebied zich in een breed ingesneden dal bevindt. De top van de Formatie van Kedichem representeert het erosievlak van een vlechtend riviersysteem.

In figuur 11 zijn de sequenties I, II, III en IV weergegeven in een schematisch blokdiag

Fig. 11. Schematisch blokdiagram van de afzettingen van de Formatie van Kedichem.

Sequentie I en II

De Formatie van Kedichem is een interglaciale afzetting die is afgezet tijdens het Waalien. De vlechtende rivieren die de grove zanden van de onderliggende Formatie van Harderwijk hebben afgezet, gaan tijdens het Waalien geleidelijk over in een meanderend systeem omdat de toevoer van water steeds constanter wordt en de permafrost verdwijnt. Dit is te zien in sequentie I. Een toenemend gehalte van de kleifractie naar boven toe (fining upward) is kenmerkend voor een meanderend systeem. De variatie binnen sequentie I is het resultaat van een afwisseling van verschillende type afzettingen (kom, oever en beddingafzettingen) als gevolg van stroomgordelverleggingen, waardoor er een lithologische variatie in zowel laterale als in verticale richting ontstaat. Het klimaat, en daarmee de watertoevoer, is aan het eind van sequentie I min of meer gestabiliseerd. Als gevolg hiervan ontstaat een stabiel meanderend systeem dat de kleilaag van sequentie II heeft afgezet. Deze kleilaag is een typische komafzetting. Sommige afgelegen komgebieden kunnen als gevolg van de snelle stijging van de zeespiegel (en dus de stijging van de grondwaterspiegel) in combinatie met een lage sedimentatiesnelheid verdrinken. De schelpen (waarschijnlijk zoetwaterschelpen) die zijn gevonden in boring 44 getuigen van de aanwezigheid van ondiepe meertjes. De zeer fijn gelaagde zandige inschakeling tussen de twee dikke kleipakketten van sequentie II is waarschijnlijk een deltatische meeropvulling. Het voorkomen van ondiepe zoetwatermeertjes in afgelegen komgebieden is een normaal verschijnsel in kustnabije zones (vergelijk de Mississippi-delta). De top van sequentie II bestaat uit een dunne veenlaag. Veen is kenmerkend voor een periode met een lage aanvoer van klastisch materiaal en een zeer stabiele relatieve daling van het gebied ten opzichte van de grondwaterspiegel.

Sequentie III en IV

De siltige afzettingen van sequentie III zijn typische oeverafzettingen. De fijnzandige inschakelingen zijn waarschijnlijk crevasse-afzettingen die zijn ontstaan bij extreem hoogwater. De meer kleiige oeverafzettingen zijn ontstaan tijdens minder extreme overstomingen. De aanzienlijke dikte van deze oeverafzettingen getuigt ervan dat de hoofdgeul, die deze oeverafzettingen heeft opgebouwd, bijzonder stabiel is geweest. Dit is een wezenlijk verschil met het meer dynamisch karakter van de meanderende afzettingen uit sequentie I. De geleidelijke trend van de afname van de kleifractie naar boven toe in de boringen 43 en 44 impliceert een afname van de afstand tot de geul. Het hoog gehalte ingespoelde plantenresten, dat nog steeds aanwezig is in de oeverafzettingen, wijst op een hoge sedimentatiesnelheid omdat het oxidatieproces blijkbaar geen kans heeft gehad om de ingespoelde plantenresten te humificeren of te laten verrotten. Uit de afwezigheid van bioturbatie in de sedimentaire structuur van de steekmonsters kan worden afgeleid dat de sedimentatiesnelheid mogelijk te hoog was om veel vegetatie te laten groeien. Uiteindelijk wordt in het hele gebied een dik blauwgrijs kleipakket (sequentie

IV) afgezet. Dit kleipakket is een goed gedraineerde komafzetting. Sporadisch komen in dit kleipakket wortelresten voor.

Een volledig ontwikkeld meanderend of anastomoserend riviersysteem zal altijd bedding-, oever- en komafzettingen vormen. Soms, in gebieden met een snelle stijging van het grondwater zoals bij kustnabije zones het geval is, kunnen ook lacustriene afzettingen worden gevormd. Elk van deze afzettingstypen zal in principe moeten worden teruggevonden, tenzij later erosie heeft plaatsgehad. De exacte grootte van de uitslag in de logs kan onderling niet worden vergeleken omdat dit per meetopstelling kan verschillen. In sequentie I zijn drie afzettingstypen teruggevonden (bedding, oever en kom). De afzettingen van sequentie II zijn gesedimenteerd in een distaal afzettingssmilieu. De uitgestrekte aanwezigheid van komafzettingen en lacustriene afzettingen in het studiegebied en de afwezigheid van oeverafzettingen, wijzen erop dat het meest nabije riviersysteem op een behoorlijke afstand heeft gelegen. Gezien het type afzetting van sequentie II is het niet te verwachten dat dit kleipakket lokaal binnen het studiegebied niet zal zijn afgezet. Het is duidelijk te zien dat de oeverafzettingen uit sequentie III in oostelijke richting steeds siltiger en uitgesprokener worden. Log van boring 27 laat twee geulsequenties zien die elk ongeveer 3 m dik zijn. Omdat deze twee geultjes niet de aanwezigheid van het dikke oeverpakket verklaren, moet er nog een andere en grotere geul aanwezig zijn in oostelijke richting. Het kleipakket van sequentie IV is qua afzettingstype en afzettingssmilieu vergelijkbaar met sequentie II, met uitzondering van de lacustriene afzettingen. Opmerkelijk is de lage uitslag voor sequentie IV in log 30. Uit de lithologische beschrijving is echter gebleken dat sequentie IV in log 30 bestaat uit sterk humeuze kleien en veen. Dit verklaart de lage uitslag in de gamma log. De top van sequentie IV is geërodeerd door het vlechtend riviersysteem, dat de zanden behorende tot de Formatie van Sterksel heeft afgezet. Sommige geulen van dit vlechtend systeem hebben zich meer dan 5 m diep ingesneden. Hierdoor kan de kleilaag van sequentie IV lokaal dun of zelfs afw

Formatie van Harderwijk en Tegelen

De Formatie van Harderwijk bestaat wederom uit afzettingen van vlechtende rivieren, echter ditmaal met een oostelijke herkomst. De Formatie van Harderwijk is uit zeer grove zanden met grind opgebouwd. Het Rijn-Maas-systeem bevond zich, ten tijde van de afzetting, op een kleine afstand in zuidelijke richting. Kleiige inschakelingen in de Formatie van Harderwijk behoren tot de Formatie van Tegelen en zijn afkomstig van het Rijn-Maas-systeem dat zich tijdelijk in noordelijke richting uitbreidde. Het onderzoeksgebied bevond zich ten tijde van de afzetting van de Formatie van Harderwijk en Tegelen op de grens tussen het invloedsgebied van uit Duitsland afkomstige oostelijke rivieren en het uit het zuiden afkomstige Rijn-Maas-systeem. In en rondom het onderzoeksgebied zijn verschillende dunne kleipakketten aangetroffen. De eerste en best verspreide kleilaag bevindt zich op ± 95 m-mv en kan enkele meters dik zijn. Lokaal kan deze laag afwezig zijn. Verder zijn er enkele dunne lokale kleivoorkomens op iets grotere diepte. De Formatie van Tegelen vormt de tweede slechtdoorlatende laag.

Formatie van Maassluis

De Formatie van Maassluis is een mariene afzetting die lithologisch sterk varieert. Zowel zanden als kleien kunnen worden aangetroffen. Door het grote aandeel van de kleien wordt de Formatie van Maassluis tot de hydrologische basis gerekend. De gemiddelde diepte van de Formatie van Maassluis in het studiegebied bedraagt 185 m.

4.2 Lokale interpretatie

Voor de lokale interpretatie tussen de boringen 43 en 44 zijn de verschillende tomogrammen, de steekmonsters, de gamma logs, de P- en S-suspension logs en de doorlatendheidsmetingen gebruikt.

4.2.1 Lithologische interpretatie

Zoals is weergegeven in het flowchart (zie 2.4) kan de lithologische opbouw worden bepaald uit het amplitude (zie bijlage F) en het snelheidstomogram (zie bijlage E, linksboven). De kleien, silt en zanden zijn te onderscheiden met behulp van het amplitudetomogram. De kleien hebben een zeer hoog signaal dempingseffect (rood gekleurd in bijlage F), terwijl de zanden veel minder dempen. De silt dempen het signaal nog minder dan zanden. Dit laatste klopt met de theorie van Biot (zie fig. 4 [Turgot, 1988]).

De indeling van de zanden in zeer grove zanden tot uiterst fijne zanden kan worden gemaakt op basis van het snelheidstomogram (zie bijlage E, linksboven). De zanden hebben een hogere snelheid naarmate ze grover worden, hetgeen ook overeenkomt met de theorie van Biot (zie fig. 4). De interpretatie van de cross-sectie is weergegeven in figuur 13. Links en rechts van de interpretatie staan de pulsmonster en gamma log interpretatie van de boringen 43 en 44. Het blijkt dat zelfs de zeer dunne kleien van 0,5 m met een beperkte laterale verbreiding door middel van de tomogrammen kunnen worden bepaald. Verder zijn individuele geulen binnen de cross-sectie te onderscheiden.

4.2.2 Doorlatendheidsinterpretatie

Zoals is weergegeven in het flowchart (zie 2.4) kan de doorlatendheid van de zanden worden bepaald door de verschillende snelheidstomogrammen per frequentieklasse (300 Hz, 500 Hz, 750 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz en 5000 Hz) te interpreteren (zie bijlage E).

Zoals is beschreven in 2.3 is er na het samenvoegen van alle snelheidstomogrammen per frequentie, voor elke gridcel van dit samengevoegd tomogram een snelheidscurve ten opzichte van de frequentie. Deze curven worden geclusterd, waardoor soortgelijke curven in één cluster terecht komen. De curven zijn opgedeeld in 6 clusters (zie fig. 12).

Als de cluster behoort bij een silt, zand of grind, hetgeen wordt beoordeeld met behulp van de lithologische interpretatie in de voorgaande paragraaf, kan de curve van de bijbehorende cluster worden vertaald met formule (4) uit 2.3 naar de doorlatendheid.

Aangezien we hoofdzakelijk te maken hebben met horizontale snelheden in het tomogram (zie 3.2.3) zijn de vertaalde doorlatendheden horizontale doorlatendheden.

Als de cluster behoort bij een afzetting die kleimineralen bevat, is het theoretisch mogelijk om de doorlatendheid af te leiden (zie 2.2). Voor deze afzettingen worden daarom de verticale doorlatendheidsmetingen gebruikt, die zijn gebruikt in het laboratorium.

Fig. 12. Frequentiecurven behorende bij de clusters 1 - 6 (zie bijlage G).

Tabel 2. Lithologische interpretatie.

clusters	horizontale doorlatendheid m	lithologie	kleur in bijlage G
3	70	zeer grof zand	lichtblauw
4	30	matig grof zand	middelblauw
5	29	zeer fijn zand	donkerblauw
6	29	uiterst fijn zand en silt	zeer donkerblauw

De doorlatendheden van de zeer grove zanden en de matig grove zanden (cluster 3 en 4) zijn vergelijkbaar met gemeten waarden uit grofkorrelige vlechtende riviersystemen, die in Maalbeek zeer gedetailleerd zijn doorgemeten [Lappere et al., 1996].

De doorlatendheden van de clusters 4 en 6, de fijne zanden en siltten, zijn echter extreem hoog. In sequentie III waar deze afzettingen voorkomen, is de verticale afwisseling van fijne zanden en siltten zeer groot. Hierdoor zal de horizontale doorlatendheid groter zijn (de doorlatendheid van fijne zanden) dan de verticale doorlatendheid, die is gemeten. Vanwege de grote afwisseling van laagjes zal de snelheid bij een hoge frequentie (hoge resolutie) relatief hoger zijn dan de snelheid bij een lage frequentie. Bij hoge frequentie is de invloedssfeer van de omgeving van een golfpad (fresnel zone) namelijk smaller dan bij lage frequenties. De curve van sequentie III zal daardoor relatief een te kleine kritische frequentie hebben en als gevolg hiervan een te grote permeabiliteit.

4.3 Combinatie regionale met lokale interpretatie van de cross-sectie

In figuur 13 en bijlage G is de uiteindelijk interpretatie weergegeven.

Fig. 13. Lithologische interpretatie van de seismische cross-sectie.

De geologische interpretatie van de seismische tomografische sectie is van onder naar

- 90 - 86 m top van de Formatie van Hardervijk, vlechtende rivierafzettingen met rechts een zeer grof zandige geulopvulling;
- 86 - 70 m sequentie I van de Formatie van Kedichem met in het midden een grove geul en naar boven toe een verfijning van de afzettingen, hetgeen duidt op de overgang naar een meanderend riviersysteem;
- 70 - 68 m sequentie II van de Formatie van Kedichem met kleiige komafzettingen;
- 68 - 59 m sequentie III van de Formatie van Kedichem met de siltige en fijn zandige anastomoserende rivierafzettingen;
- 59 - 57 m sequentie IV van de Formatie van Kedichem met kleiige komafzettingen;
- 57 - 40 m Formatie van Sterksel met zeer grove zanden aan de onderkant en een fijne geulopvulling. Links en rechts van de geul zien we nog de oorspronkelijke dunne kleilaagjes die niet door de geul zijn geërodeerd.

HOOFDSTUK 5

CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

1. Met behulp van seismische tomografie kan een continu beeld van de ondergrond worden verkregen.
2. De energie-inhoud van de seismische P-golf cross-hole metingen is zodanig dat ook grotere afstanden tussen de boringen mogelijk zijn.
3. Er bestaat een relatie tussen de seismische P-golfsnelheid en de lithologie, die zowel naar voren komt uit de P-suspension log als de tomografische sectie. Kleien, zeer grove zanden, matig grove zanden, fijne zanden en silten zijn respectievelijk te correleren met afnemende snelheden. Alleen de overgangen tussen klei en zeer grof zand enerzijds en fijn zand en silt anderzijds zijn niet altijd eenduidig te interpreteren.
4. In dergelijke gevallen biedt het P-golf dempingstomogram wel de mogelijkheid om het onderscheid te maken. De kleien hebben een grote dempende werking en de silten een zeer kleine in verhouding met de zanden.
5. De permeabiliteit, die is afgeleid met behulp van de golftheorie van Biot, komt voor wat betreft de zanden overeen met de gemeten waarden, voor de kleien en de silten is het echter noodzakelijk de gemeten laboratoriumwaarden te nemen.
6. De S-golf heeft geen waarneembare relatie met de lithologie of de permeabiliteit.

Om een betere schatting te krijgen van de permeabiliteit van silten en kleien zou er theoretisch onderzoek moeten worden gedaan naar de invloed van de aanwezigheid van kleimineralen op de kritische frequentie.

Daarnaast zou het goed zijn om ook de demping per frequentieklasse te bekijken, waardoor er een tweede schatting van de kritische frequentie kan worden gemaakt (zie fig. 4). Deze geeft misschien een betere schatting van de permeabiliteit voor silten.

LITERATUUR

Bourbie, T., et al., 1987.
Acoustics of porous media.
Gulf Publishing Company, Houston.

Daniel, D.E. et al., 1984.
Permeability testing with flexible-wall permeameters.
Geotechnical Testing Journal, vol. 7, nr. 3.

Dijkshoorn, L., 1991.
Relation between porosity, lithology, permeability and seismic reflectors in shallow su
University of Utrecht, Geophysical Department, Ms.Sc. Thesis.

Keller, J.D., 1989.
Acoustic wave propagation in composite fluid-daturated media.
Geophysics, vol. 54, nr. 12.

Lappere, R.E., et al., 1996.
Variatie in permeabiliteit van een pleistocene rivierafzetting en de invloed op grondwat
H₂O, vol. 29, nr. 18.

Marion, D., A. Nur, H. Yin en D. Han, 1992.
Compressional velocity and porosity in sand and clay mixtures.
Geophysics, vol. 57, nr. 4.

Norusis, M.J., 1992.
SPSS, Professional Statistics, ISBN 0-923967-67-2.

Storms, J.E.A, L. Dijkshoorn en E. Kreft, 1996.
Sedimentologie van de Formatie van Kedichem nabij Linschoten. Lokaal onderzoek naar de fluvia
ontstaanswijze van de Formatie van Kedichem met betrekking tot de lithologische variabiliteit en
hydraulische doorlatendheid.
Rijks Geologische Dienst (RGD), rapportnummer GB2516.

Stewart, R.R., 1993.
Exploration seismic tomography: Fundamentals.
S.N. Domenico, Series Editor Course Notes Series, vol. 3.

Tang, X.M., E.C. Reiter en D.R. Burns, 1995.
A dispersive-wave processing technique for estimating formation shear wave velocity from dipole and
Stoneley waveforms.
Geophysics, vol. 60, nr. 1.

Turgut, A. en T. Yamamoto, 1988.
Synthetic seismograms for marine sediments and determination of porosity and perm
Geofysics, vol. 53, nr. 8.

Zagwijn, W.H. en C.J. van Staalduinen, 1975.
Toelichting Geologische Overzichtkaarten van Nederland.
Rijks Geologische Dienst, Haarlem.

Geraadpleegde literatuur:

Byun, B.S., D. Corrigan en J.E. Gaiser, 1989.
Anisotropic velocity analysis for lithology discrimination.
Geophysics, vol. 54, nr. 12.

Dijkshoorn, P., 1994.
Cross-Hole tomography for engineering geological site investigations: The TGV in Belg
TU Delft, Engineering Geology, Ms.Sc. Thesis.

Hyndman, D.W., J.M. Harris en S.M. Gorelick, 1994.
Coupled seismic and tracer test inversion for aquifer property characterisation.
Water Resources Research, vol. 30, nr. 7.

Lubbers, P.J., 1995.
Risico-analyse voormalige stortplaats Mastwijk voor pompstation Linschoten.
Waterleidingbedrijf Midden-Nederland (WMN), rapportnummer HY 95-03.

Macrides, C.G., E.R. Kanasewich en S. Bharatha.
Multiborehole seismic imaging in steam injection heavy oil recovery projects.

Marion, D. en A. Nur, 1991.
Pore-filling material and its effect on velocity in rocks.
Geophysics, vol. 56, nr. 2.

Rubin, Y.A., G. Marko en J. Harris, 1992.
Mapping permeability in heterogeneous aquifer using hydrologic and seismic data.
Water Resources Research, vol. 28, nr. 7.

Wang, Z. en A. Nur, 1990.
Wave velocities in hydrocarbon-saturated rocks: Experimental results.
Geophysics, vol. 55, nr. 6.

Zhou, C., W. Cai, G.T. Schuster, en S. Hassanzadeh, 1995.
Acoustic wave-equation travelttime and waveform inversion of crosshole seismic data.
Geophysics, vol. 60, nr. 3.

BIJLAGE A1

BOORBESCHRIJVING VAN BORING 43

BIJLAGE A2

BOORBESCHRIJVING VAN BORING 44

BIJLAGE B1

**STEEKMONSTERBESCHRIJVING, DOORLATENDHEIDSMETINGEN
EN GAMMA LOG VAN BORING 43**

BIJLAGE B2

**STEEKMONSTERBESCHRIJVING, DOORLATENDHEIDSMETINGEN
EN GAMMA LOG VAN BORING 44**

BIJLAGE C1

P- EN S-SUSPENSION LOG VAN BORING 43

BIJLAGE C2

P- EN S-SUSPENSION LOG VAN BORING 44

BIJLAGE D

EFFECTEN VAN ANISOTROPIE VAN DE SNELHEID

BIJLAGE E

**SNELHEIDSTOMOGRAMMEN VAN VERSCHILLENDE FREQUENTIE-
KLASSEN**

BIJLAGE F

AMPLITUDE TOMOGRAM

BIJLAGE G

**RESULTAAT VAN DE SNELHEIDSTOMOGRAMMEN NA CLUSTER
ANALYSE**

BIJLAGE H

FOTO'S VAN DE APPARATUUR EN DE P- EN S-BRON