

NOBIS 95-2-01
STRATEGIE VOOR KARAKTERISATIE VAN
DE HYDRAULISCHE HETEROGENITEIT VAN
ANTROPOGENE BODEMS

ir. C.M. Breukink (IWACO B.V.)
ir. T. van Hille (Gemeentewerken Rotterdam Ingenieursbureau)
dr. J.A.C. Meekes (NITG TNO)
drs. L. Vasak (NITG TNO)
ir. M. van Zutphen (NITG TNO)

februari 1999

Gouda, CUR/NOBIS

Auteursrechten

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze opgave 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 enige 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, "©"Strategie voor karakterisatie van de hydraulische heterogeniteit van antropogene bodems", februari 1999, 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, "©"Strategy for characterization of the hydraulic heterogeneity of man-made soils", February 1999, 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

Strategie voor karakterisatie van de hydraulische heterogeniteit van antropogene bodems

CUR/NOBIS rapportnummer

95-2-01

Project rapportnummer

95-2-01

Auteur(s)

ir. C.M. Breukink
ir. T. van Hille
dr. J.A.C. Meekes
drs. L. Vasak
ir. M. van Zutphen

Aantal bladzijden

Rapport: 40
Bijlagen: 49

Uitvoerende organisatie(s) (Consortium)

Ontwikkelingsbedrijf Rotterdam (ing. P.A.J.M. de Vet, 010-4895856)
Stichting Bodemsanering NS (ir. G. Stokman, 030-2988310)
Gemeentewerken Rotterdam Ingenieursbureau (ir. T. van Hille, 010-4896194)
IWACO Adviesbureau voor water en milieu (ir. C.M. Breukink, 010-2865510)
Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO (drs. L. Vasak, 015-2697118)

Uitgever

CUR/NOBIS, Gouda

Samenvatting

De doelstelling van het project luidt: het karakteriseren met innovatieve technieken van de hydraulische heterogeniteit van de ondergrond, als basis voor het ontwerp en de dimensionering van de toekomstige in situ sanering. De doelstelling is in drie onderdelen uitgewerkt:

1. opstellen van een onderzoeksstrategie waarmee meettechnieken kunnen worden geselecteerd;
2. toepassen van deze strategie in twee cases;
3. evaluatie van een viertal innovatieve meettechnieken: elektromagnetisme (EM), georadar, seismische tomografie en mini-slugtest.

De conclusies luiden dat de karakterisatie van antropogene bodems alleen op basis van een conventioneel onderzoek (contourenbenadering) geen verantwoorde beschrijving van de realiteit geeft. De voorgestelde methodologie, waarin de conventionele en innovatieve technieken worden geïntegreerd, kan ondanks tekortkomingen van de individuele technieken het ruimtelijke beeld van de heterogeniteit beter beschrijven. De toepasbaarheid van de innovatieve technieken is gevoelig voor storingen, zoals metalen voorwerpen (ME, georadar), gas (tomografie) en aanwezigheid van fijne fractie in overwegend grof sediment (mini-slugtest).

De toegepaste methodologie heeft een duidelijke bijdrage geleverd aan het inzicht in de heterogeniteit van de ondergrond.

Trefwoorden**Gecontroleerde termen:**

bodemprofiel, doorlatendheid, meetgegevens, methodiek, radar

Vrije trefwoorden:

antropogene bodems, elektromagnetisme, geohydrologie, mini-slugtest, tomografie

Titel project

Strategie voor karakterisatie van de hydraulische heterogeniteit van antropogene bodems

Projectleiding

Gemeentewerken Rotterdam
Ingenieursbureau
(ir. T. van Hille, 010-4896194)

Dit rapport is verkrijgbaar bij:
CUR/NOBIS, Postbus 420, 2800 AK Gouda

Report title
Strategy for characterization of the hydraulic heterogeneity of man-made soils

CUR/NOBIS report number
95-2-01

Project report number
95-2-01

Author(s)
ir. C.M. Breukink
ir. T. van Hille
dr. J.A.C. Meekes
drs. L. Vasak
ir. M. van Zutphen

Number of pages
Report: 40
Appendices: 49

Executive organisation(s) (Consortium)

Rotterdam City Development Company (ing. P.A.J.M. de Vet, +31 10-4895856)
Soil remediation Foundation NS (ir. G. Stokman, +31 30-2988310)
Rotterdam Public Works Civil Engineers (ir. T. van Hille, +31 10-4896194)
IWACO Water and Environment Consultants (ir. C.M. Breukink, +31 10-2865510)
Netherlands Institute of Applied Geoscience TNO (drs. L. Vasak, +31 15-2697118)

Publisher
CUR/NOBIS, Gouda

Abstract

Main goal of the project is characterization of hydraulic heterogeneity of the subsurface with innovative techniques, foundation for design of the future in situ remediation. This was applied in three different parts:

1. formulate a research strategy for selecting appropriate measurement techniques;
2. application of this strategy on two cases;
3. evaluate four innovative techniques: electromagnetism, georadar, seismic tomography and mini slug tests.

It is concluded characterization of man-made soils only on a contour base doesn't give a reliable description of the real situation. The proposed methodology in which both conventional and innovative techniques are involved, gives a better spatial description of the heterogeneity in spite of some shortcomings of the techniques. Geophysical techniques are sensible for disturbances like metals (EM, radar), gas (tomography) or fine fractions in coarse sand (mini slug tests).

The applied methodology has demonstrably contributed to the understanding of the heterogeneity of the subsurface.

Keywords

Controlled terms:

measured data, methodology, radar, soil profile, transmissivity test,

Uncontrolled terms:

electromagnetism, geohydraulics, man-made soils, mini slug tomography

Project title
Strategy for characterization of the hydraulic heterogeneity of man-made soils

Projectmanagement
Rotterdam Public Works Civil Engineers
(ir. T. van Hille, +31 10-4896194)

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

INHOUD

		SAMENVATTING	vi
		SUMMARY	xi
Hoofdstuk	1	INLEIDING	1
		1.1 Consortium	1
		1.2 Probleemstelling	1
		1.3 Strategie	1
		1.4 Projectconcept	3
		1.5 Doelstellingen	3
		1.6 Locatiekeuze	4
		1.7 Opbouw van het rapport	4
Hoofdstuk	2	ONDERZOEKSSTRATEGIE	5
		2.1 Inleiding	5
		2.2 Specificatie van de te genereren gegevens	5
		2.3 Methodologie	6
		2.3.1 Inventarisatie van de beschikbare informatie	6
		2.3.2 Hypothese van de bodemsamenstelling en de verontreiniging	6
		2.3.3 Cyclisch proces: saneringstechnieken, schaalgrootte en meettechnieken	6
		2.3.4 Selectie van technieken voor acquisitie van aanvullende gegevens	8
		2.3.5 Data-acquisitie	8
		2.3.6 Databewerking en integratie van de resultaten	9
		2.3.7 Keuze van de saneringstechnieken	9
Hoofdstuk	3	BESCHRIJVING VAN DE TOEGEPASTE TECHNIEKEN	11
		3.1 Principes innovatieve technieken	11
		3.1.1 Georadar	11
		3.1.2 Elektromagnetische technieken	12
		3.1.3 Seismische tomografie	13
		3.1.4 Mini-slugtest	14
Hoofdstuk	4	EVALUATIE CONVENTIONEEL BODEMONDERZOEK OP HET KIEBOOM-TERREIN	17
		4.1 Inleiding	17
		4.2 Locatiekeuze Kieboom-terrein	17
		4.3 Herkomst van de basisinformatie	17
		4.4 Uitkomsten van het ANO-1996	18
		4.5 Vergelijking	19
		4.6 Conclusies	20
Hoofdstuk	5	CASE STUDIES	21
		5.1 Case Kieboom	21
		5.1.1 Locatiebeschrijving en hypothese	21
		5.1.2 Bodemopbouw en zintuiglijke verontreinigingen	21
		5.1.3 Interpretatie '98: boringen	21

	5.1.4	Sonderingen	22
	5.1.5	Sleuven	22
	5.1.6	Georadar	23
	5.1.7	Elektromagnetisme	24
	5.1.8	Tomografie	25
	5.1.9	Mini-slugtests	25
	5.1.10	Conclusies met betrekking tot de bodem van het Kieboom-terrein	26
	5.2	Case Mijdrecht	27
	5.2.1	Locatiebeschrijving en hypothese	27
	5.2.2	Bodemopbouw en zintuiglijke verontreinigen	27
	5.2.3	Interpretatie: boringen	27
	5.2.4	Seismische tomografie	29
	5.2.5	Mini-slugtests	29
	5.2.6	Bodemopbouw	30
	5.2.7	Conclusies	30
Hoofdstuk	6	EVALUATIE VAN DE TECHNIEKEN	31
	6.1	Uitvoeringsaspecten	31
	6.2	Ruimtelijke beschrijving van de bodemheterogeniteit	32
	6.3	Indicatie van de kosten	32
Hoofdstuk	7	TOEPASSING VAN DE ONDERZOEKSSTRATEGIE (OP LOCATIE KIEBOOM)	33
Hoofdstuk	8	CONCLUSIES	37
		LITERATUUR	39
Bijlage	A	LOCATIE KIEBOOM: SITUATIETEKENING	
Bijlage	B	LOCATIE KIEBOOM, BORING 128: FOTO EN BOORBESCHRIJVING	
Bijlage	C	LOCATIE KIEBOOM: BODEMPROFIEL	
Bijlage	D	LOCATIE KIEBOOM: SONDERINGEN	
Bijlage	E	LOCATIE KIEBOOM: VELDWERK SLEUVEN, PROEFGATEN EN FILTERS VOOR SEISMISCHE METINGEN	
Bijlage	F	LOCATIE KIEBOOM: FOTO'S VAN SLEUVEN	
Bijlage	G	LOCATIE KIEBOOM: BODEMBESCHRIJVING VAN SLEUF A-G	
Bijlage	H	LOCATIE KIEBOOM: RESULTATEN EM, GEORADAR 50 EN 200 MHz EN MINI-SLUGTESTS	
Bijlage	I	LOCATIE KIEBOOM: COMBINATIE RESULTATEN GEORADAR 50 MHz EN MINI-SLUGTESTS	
Bijlage	J	LOCATIE KIEBOOM: RADARGRAMMEN 50 MHz	

Bijlage	K	LOCATIE KIEBOOM: RADARGRAMMEN 200 MHz
Bijlage	L	LOCATIE KIEBOOM: FOTO'S VAN MINI-SLUGTESTS
Bijlage	M	LOCATIE KOEK: SITUATIETEKENING
Bijlage	N	LOCATIE KOEK, BORING 38: FOTO EN BOORBESCHRIJVING
Bijlage	O	LOCATIE KOEK: BOORPROFIEL 3 VAN BORINGEN 21-38-22-45
Bijlage	P	LOCATIE KOEK: TOMOGRAMMEN
Bijlage	Q	LOCATIE KOEK: FOTO'S VAN SEISMISCHE TOMOGRAFIE

SAMENVATTING

Strategie voor karakterisatie van de hydraulische heterogeniteit van antropogene bodems

Doelstellingen

De doelstelling in het onderzoek is: *'Het karakteriseren met innovatieve technieken van de hydraulische heterogeniteit van de ondergrond, als basis voor het ontwerp en de dimensionering van de toekomstige in situ sanering'*.

Hierbij wordt gebruik gemaakt van verschillende technieken en methoden. Hieronder vallen georadar, elektromagnetische methoden, seismische tomografie en mini-slugtests alsmede het graven van sleuven voor een verfijning van de kennis omtrent de heterogeniteit van de ondergrond.

De onderzoeksstrategie, toegepast voor het bepalen van de hydraulische heterogeniteit, omvat in principe 2 stappen:

1. specificatie van de gegevens die nodig zijn voor de beschrijving van kritische parameters;
2. opstellen van de methodologie om de gewenste gegevens te genereren.

Specificatie van gegevens

Om het transport en de positie van de verontreiniging in de ondergrond te bepalen zijn de volgende gegevens nodig:

- verticale begrenzing van de lagen (diepte en dikte);
- horizontale begrenzing van de lagen (continuïteit);
- doorlatendheid (k) en weerstand (c) van respectievelijk zand-, klei- of veenlagen.

Methodologie

De volgende stappen worden onderscheiden die in chronologische volgorde (*gedeeltelijk* in een iteratief proces) worden doorlopen:

1. Interpreteren van de beschikbare locatiespecifieke informatie, met name hydrogeologische eigenschappen (en aard en verspreiding van de verontreiniging).
2. Opstellen van de hypothese over de bodemopbouw (en de verontreinigingssituatie).

In een cyclisch proces:

3. Definiëren van de potentiële saneringstechnieken.
4. Bepalen van de vereiste schaalgrootte voor de te onderzoeken parameters in relatie tot de saneringstechnieken.
5. Selecteren van de meettechnieken in relatie tot de parameters en de schaalgrootte.

Vervolgens:

6. Data-acquisitie.

In een cyclisch proces:

7. Dataverwerking.
8. Construeren van een driedimensionaal beeld van de bodem (en de verontreiniging).
9. Met behulp van modellering ontwerpen van de sanering.

Vervolgens:

10. Keuze en implementatie van de (combinatie van) saneringstechniek(en).

Toegepaste innovatieve technieken

Voor de geohydrologische karakterisatie zijn de volgende innovatieve technieken toegepast:

Georadar en elektromagnetische meetmethoden

Door middel van deze geofysische technieken wordt vanaf het oppervlak een kwalitatief beeld verkregen van relatief geohydrologisch homogene gebieden.

Mini-slugtests

Door middel van het uitvoeren van mini-slugtests worden, op een geringe ruimtelijke schaal, relatieve doorlatendheidsverschillen aangetoond. Ook wordt een richtwaarde voor de doorlatendheid bepaald.

Seismische tomografie

Seismische tomografie is een methode voor het in kaart brengen van geologische structuren in de ondergrond. Hierbij wordt een driedimensionaal beeld verkregen van de structuur van de ondergrond en derhalve van de zones met verschillen in hydraulische eigenschappen.

Resultaten case Kieboom

Locatiebeschrijving en bodemopbouw

De onderzoekslocatie Kieboom te Rotterdam (zie bijlage A) heeft een oppervlakte van circa 1 ha. De locatie wordt gekenmerkt door een antropogene bodem, bestaande uit siltige en zandige ophooglagen, mogelijk vermengd met grove ophoogmaterialen, opgebracht op een oorspronkelijk maaiveld van humeuze klei op veen.

Vanaf het maaiveld tot circa 1,6 meter beneden het maaiveld (m-mv) is licht siltig zand aangetroffen met bijmengingen van puin en/of koolas. Onder het zand is een licht zandige, humeuze kleilaag aangetroffen. Vanaf circa 6,5 m-mv bestaat de bodem uit veen tot circa 11 m-mv. Dieper is humeuze klei waargenomen.

Innovatieve technieken

Georadar

Op basis van radarprofielen van de 50 MHz metingen en de 200 MHz metingen zijn radarstratigrafische hoofdeenheden en (sub)eenheden geclassificeerd. Ook kan de grondwaterspiegel in het gebied goed uit de verkregen profielen worden gedestilleerd. Naast de duidelijke reflectoren blijkt vooral de penetratiediepte een duidelijk onderscheidend criterium voor het definiëren van de radarstratigrafische eenheden.

Elektromagnetisme

Van de metingen uitgevoerd met de horizontale coplanaire spoelen is circa 95 % niet bruikbaar vanwege de geringe weerstand. De metingen verricht met de verticale coplanaire spoelen zijn wel bruikbaar. De waarden tussen 5 Ω m en 20 Ω m geven aan dat het grondwater zeer brak tot zout is.

Tomografie

De bovenste paar meter hebben een zodanig sterke dempende werking op de seismische golven dat geen tomogram kan worden geconstrueerd. Recentelijk bij TNO beschikbaar gekomen analyses van andere seismische gegevens duiden ook op een hoge demping van de sedimenten van de bovenste paar meter op andere locaties.

Mini-slugtests

Op basis van de resultaten zijn drie categorieën van doorlatendheden aan te geven:

1. zone met een goede doorlatendheid met k -waarden van 1 m/d en hoger;
2. zone met een geringe doorlatendheid met k -waarden kleiner dan 1 m/d;
3. zone waarbij geen water wordt verkregen en de doorlatendheid dus laag is ($k < 0,1$ m/d).

Sonderingen

De sondeergrafieken van de uitgevoerde sonderingen geven geen significante verschillen te zien en een eenduidige relatie tussen de meetwaarden van de sonderingen en de mini-slugtests is dus niet uit de resultaten op te maken.

Conclusies

- Het geofysische onderzoek heeft duidelijk gemaakt dat de variabiliteit in de ondergrond wordt aangetoond door de combinatie van zowel de boorgegevens als de radargegevens.
- Een redelijke overeenkomst tussen de penetratiediepte van radar/EM en de diepteligging van de top van de diepere kleilaag is aanwezig.
- De grote variabiliteit (schaal enkele meters) in combinatie met een te beperkt begrip van de oorzaak van signalen bemoeilijkt de correlatie tussen boorgegevens en radarprofielen.
- Met de mini-slugtests kunnen zones met verschillen in doorlatendheid duidelijk worden onderscheiden.
- Uit de sonderingen blijkt dat de verschillen in doorlatendheid, zoals gemeten met de mini-slugtests, niet kunnen worden toegeschreven aan een verschil in compactie als gevolg van verkeersbelasting.

Resultaten Case Mijdrecht

Locatiebeschrijving en bodemopbouw

De onderzoekslocatie Koek te Mijdrecht (zie bijlage M) heeft een oppervlakte van circa 1,5 ha en is deels bedekt met een betonnen verharding. Het terrein is in gebruik geweest voor de sloop van transformatoren en treinstellen.

De toplaag van het bedrijfsterrein bestaat uit een zandlaag met een dikte van 0,6 tot 2,4 m. Hieronder bevindt zich een 5 meter dikke deklaag van klei, veen en slibhoudend zand waaronder zich het eerste watervoerende pakket bevindt. Het freatische niveau in de zandlaag op het terrein varieert rond één meter onder het maaiveld.

Innovatieve technieken

Seismische tomografie

De reproduceerbaarheid van het bronsignaal is goed, waardoor de bepaling van het dempingstomogram betrouwbaar is. De opgenomen data bevatten veel achtergrondruis door het verkeer op de weg rondom de locatie en van de installaties (zeven en een zware centrifuge) op het terrein. De bewerkte data zijn omgezet in driedimensionale snelheidstomogrammen en tweedimensionale dempingstomogrammen. De grafische weergave van de driedimensionale snelheidstomogrammen is opgenomen in bijlage P (zie fig. P2, P3 en P4).

De tweedimensionale dempingstomogrammen zijn minder exact, doordat bij de bepaling alleen van de directe golven wordt uitgegaan. De tweedimensionale dempingstomogrammen zijn weer gegeven in bijlage P (zie fig. P5 en P6).

Van de toplaag zijn geen betrouwbare signalen ontvangen, zodat de lithologie vanaf de kleilaag (ca. 1,5 à 2 m-mv) tot circa 7 m-mv wordt beschreven.

In bijlage P (zie fig. P7) is een semi-driedimensionale weergave van het snelheidstomogram van het gebied gegeven. Hierin zijn de verschillen in doorlatendheden (kwalitatief) aangegeven op basis van lithologische eenheden.

Mini-slugtests

De gemeten doorlatendheid varieert van 0,05 tot 4,4 m/d. Op enkele plaatsen is de doorlatendheidsmeting niet succesvol door onbekende oorzaken, terwijl de korrelgrootteverdeling van het sediment een goede doorlatendheid doet vermoeden. In tabel 8 (zie 5.2.3) zijn de resultaten weergegeven van de mini-slugtests en de doorlatendheidsbepalingen aan de hand van de korrelgrootteverdelingen. Hieruit blijkt dat in sommige gevallen een verschil van meer dan een orde optreedt (zowel onderschattingen als overschattingen).

De bodemopbouw op basis van de seismische tomografie en de mini-slugtests komt echter in het algemeen goed overeen met de waarnemingen van de boringen en geeft een duidelijk beeld van de doorlatendheid in het gebied.

Conclusies

- Een relatie tussen de lithologie enerzijds en het snelheids- en dempingstomogram anderzijds is aangetoond.
- Indien lagen volledig verzadigd zijn, kan in de tomogrammen onderscheid worden gemaakt tussen klei en zand. De zandlagen kunnen met tomografie verder worden ingedeeld in 'fijn' of 'grof'.
- De doorlatendheidsmetingen met behulp van de mini-slugtests zijn gedeeltelijk in overeenstemming met de verwachtingen op basis van de bodemopbouw en de visuele waarnemingen van 'falling head' proeven in boorgaten en peilfilters op de locatie.
- De aanwezigheid van fijn sediment in de grove fractie kan de bepaling van de absolute *k*-waarde beïnvloeden.

Evaluatie van de technieken

Uitvoeringsaspecten

De vergelijking van de uitvoeringsaspecten van de toegepaste technieken is samengevat in de volgende tabellen.

Logistiek.

techniek	storingen	overlast
georadar	metaal	geen
EM	metaal	geen
tomografie	gas in bodem	matig
mini-slugtest	beton	matig

Dieptebereik (m) op Kieboom en Koek.

techniek	diepte	afhankelijk van
georadar	0 - 5/12	systeemkeuze en elektrische geleiding van de bodem
EM	0 - 10	systeemkeuze
tomografie	2/4 - 8	diepte boorgat
mini-slugtest	1 - 3	grondwaterdiepte en kleilagen

Resolutie (m) op Kieboom en Koek.

techniek	verticaal	horizontaal
georadar (100 - 200 MHz)	0,5	0,5
EM (10 m spoelafstand)	geen	10
tomografie	1	1
mini-slugtest	0,5	geen

Indicatie van de kosten

De globale kosten voor metingen (inclusief interpretatie), op een terrein met vergelijkbare grote en toegankelijkheid als het Kieboom-terrein, zijn weergegeven in de volgende tabel.

Globale kosten van de innovatieve technieken toegepast op het Kieboom-terrein.

techniek	kosten (f)
georadar	10.000,00
elektromagnetisme	5.000,00
seismische tomografie	15.000,00
mini-slugtests ¹	7.000,00

¹ 15 meetpunten in het horizontale vlak met 2 metingen per punt

Conclusies met betrekking tot de toepassing van de onderzoeksstrategie op de cases (Kieboom en Mijdrecht)

1. Met georadar en met seismische tomografie is de discriminatie van eenheden met verschillende helling, dikte en continuïteit mogelijk.
2. Correlatie van de metingen met lithologie is mogelijk indien:
 - informatie uit boringen aanwezig is;
 - samenstelling van formatiewater bekend is (EM);
 - storende objecten aan het oppervlak en in de bodem bekend zijn (georadar).
3. Kwantificering van de doorlatendheid van de uit geofysisch onderzoek geïnterpreteerde lithostratigrafische eenheden is alleen mogelijk met directe metingen, bijvoorbeeld met behulp van mini-slugtests.
4. De toegepaste methodologie heeft een duidelijke bijdrage geleverd aan de toename van het inzicht in de heterogeniteit van de ondergrond voor saneringslocaties.

SUMMARY

Strategy for characterization of the hydraulic heterogeneity of man-made soils

Objectives

The objective of the project is: *'To use innovative technologies to characterize the hydraulic heterogeneity of the subsurface as a basis for designing and dimensioning its future in situ remediation'*.

To do this, a variety of techniques and methods are being used. These include georadar, electromagnetic methods, seismic tomography and mini-slug tests, as well as the digging of trenches for refining our knowledge of the heterogeneity of the subsurface.

The strategy applied for determining the hydraulic heterogeneity essentially involves two steps:

1. specifying the data required for describing the critical parameters;
2. drawing up a systematic procedure (methodology) for generating the desired data.

Data specification

To determine the transport and position of the contaminants in the subsurface, the following data are required:

- vertical boundaries of the layers (depth and thickness);
- horizontal boundaries of the layers (lateral continuity);
- hydraulic conductivity (k) and hydraulic resistivity (c) of respectively sand layers and clay/peat layers.

Methodology

The procedure involves the following steps, which should be carried out in sequence (*partially* as an iterative process):

1. Interpreting all the site specific information available i.e. hydraulic characteristics (and contaminant nature and spreading).
2. Defining a hypothetical model of the near-surface geology (and the nature and extent of the contaminants).

As part of a cyclic process:

3. Identifying potential remediation techniques.
4. Determining the required scale of the parameters to be investigated in relation to the remediation techniques.
5. Selecting the required measuring techniques in relation to the parameters and the scale.

Followed by:

6. Data acquisition.

As part of a cyclic process:

7. Data processing.
8. Constructing a three-dimensional picture of the subsurface (and the contaminants).
9. Designing the remediation programme using modelling techniques.

Followed by:

10. Selection and implementation of the (combination of) remediation technique(s).

Innovative technologies used

For the geohydrological characterization the following innovative techniques were used:

Georadar and electromagnetic (EM) methods

The geophysical technique georadar and electromagnetic (EM) methods are used to obtain a qualitative image of zones with relatively geohydrologically homogeneous characteristics.

Mini-slug tests

Mini-slug tests are used to determine relative differences in hydraulic conductivities at a small scale. With the tests a reference value for the permeability can be determined.

Seismic tomography

Seismic tomography is a method for mapping out subsurface geological structures. It gives a three-dimensional picture of the subsurface structure, including zones which differ in terms of hydraulic characteristics.

Results: Kieboom case study

Site description and near-surface geology

The Kieboom site in Rotterdam (see Appendix A) covers a surface area of approximately one hectare (10,000 m²). The site is characterized by an anthropogenic subsoil consisting of silty and sandy layers, possibly mixed with coarse fill materials used for further raising the surface, superimposed on an original surface of humus-rich clay and peat.

From the surface to a depth of approximately 1.6 metres below grade (mbg), slightly silty sand was encountered with intermixed rubble and/or coal ash. The sand is underlain by a slightly sandy, humus-rich claylayer. The section between approximately 6.5 mbg and 11 mbg consists of peat; it rests on humus-rich clay.

Innovative techniques

Georadar

On the basis of radar profiles (measurements at 50 MHz and 200 MHz) the main radar stratigraphic units and (sub)units have been classified. It was also possible to accurately identify the water table from the profiles. Apart from the obvious reflectors it was found that the penetration depth in particular was a good criterion for defining the radar stratigraphic units.

Electromagnetic (EM) methods

Approximately 95 % of the measurements performed using horizontal coplanar coils could not be used, due to low resistivities. In contrast, the measurements performed with vertical coplanar coils produced good results. Resistivity values between 5 Ωm and 20 Ωm indicate that the groundwater is very brackish to salty.

Seismic tomography

The first metres had such a strongly attenuating effect on the propagation of the seismic waves that it was not possible to construct a tomogram. Analyses of other seismic data that have recently become available at TNO also indicate a high attenuation in the sediments in the uppermost metres at other locations.

Mini-slug tests

Based on the results, three permeability characteristic zones were determined:

1. a zone with good permeability: $k \geq 1$ m/d;
2. a zone with moderate permeability: $k \leq 1$ m/d;
3. a zone that yielded no water and in which the permeability was therefore even lower ($k < 0.1$ m/d).

Soil penetration tests

Soil penetration tests were conducted to investigate the relation between the permeabilities determined with the mini-slug tests and the compaction of the sediment due to traffic. The graphs of the penetration test did not indicate significant variation. Therefore it was not possible to establish an unambiguous relation between the values measured for the penetration test parameters and the mini-slug tests. The differences in permeability cannot be ascribed to a difference in compaction as a result of traffic loads.

Conclusions Kieboom case study

- The geophysical investigation showed that the variability in the subsurface is reflected in both the drilling and the radar data.
- There is reasonable agreement between the penetration depth of radar/EM and the depth to the top of the lower clay layer.
- The large variability (at a scale of a few metres), combined with a limited understanding of the causes of the signals, makes it difficult to correlate the drilling data and the radar profiles.
- With the mini-slug tests zones with variation in permeability can be determined.
- The differences in permeability measured with mini-slug tests and calculated from soil penetration tests cannot be ascribed to a difference in compaction as a result of traffic loads.

Results: Mijdrecht case study

Site description and near-surface geology

The Koek site near Mijdrecht (see Appendix M) has a surface area of approximately 1.5 hectares and is partially covered with a concrete paving. The site was used as a wrecker's yard for scrapping transformers and trains.

The top layer at this industrial site consists of an anthropogenic sand with a thickness between 0.6 and 2.4 meters. It is underlain by a 5-m. thick confining layer of clay, peat and silty sand, below which is the first aquifer. At the site, the phreatic level in the anthropogenic sand layer is at around one meter below grade.

Innovative techniques

Seismic tomography

The reproducibility of the source signal was good, which means that the determination of the attenuation tomogram is reliable. The recorded data contain considerable background noise caused by traffic along the road bordering the site and by various types of heavy machinery, including a heavy-duty centrifuge, still in operation at the site. The processed data have been converted into three-dimensional velocity tomograms and two-dimensional attenuation tomograms. Graphic representations of the three-dimensional velocity tomograms are included in Appendix P (see Figs. P2, P3 and P4). The two-dimensional attenuation tomograms are less accurate because they are based only on direct waves. The two-dimensional attenuation tomograms are presented in Appendix P (see Figs. P5 and P6). No reliable signals were received for the uppermost layer, so that only the lithology from the clay layer (approx. 1.5 to 2 mbg) to a depth of approximately 7 mbg is covered.

In Appendix P (see Fig. P7) is presented a semi-three-dimensional representation of the velocity tomogram for the area. Differences in permeability are indicated (qualitatively) on the basis of the lithologic units.

Mini-slug tests

The measured permeabilities vary between 0.05 to 4.4 m/d. At a few places the permeability measurement was not successful through unknown causes, even though the grain-size distribution of the sediment suggests a high permeability. In Table 8 (see 5.2.3) the results of the mini-slug tests are presented as well as the permeabilities determined from the grain-size distributions. In some cases the two sets of results differ by more than a order of magnitude (both under and over estimates). On the whole, the near-surface geology indicated by the seismic tomography and the mini-slug tests was in good agreement with drilling data and gave a clear picture of the permeability in the area.

Conclusions

- There is a relation between the lithology on one hand and both the velocity and attenuation tomograms on the other.
- When the layers are completely saturated, the tomograms allow a distinction to be drawn between sand and clay. The layers of sand can be further divided into 'fine-grained' and 'coarse-grained'.
- The permeability values obtained from the mini-slug tests are not always in agreement with those expected from a knowledge of the near-surface geology and the visual observations of 'falling head' tests in boreholes and observation wells at the site.
- The presence of fine-grained sediment in the coarse-grained fraction can influence the determination of the absolute *k*-value.

Evaluation of the techniques

Practical aspects

A comparison of the practical aspects of the various techniques is summarized in the following tables.

Logistics.

technique	interference	inconvenience
georadar	metal	none
EM	metal	none
tomography	gas in soil	moderate
mini-slug test	concrete	moderate

Penetration depth (m) at Kieboom and Koek.

technique	depth	dependent on
georadar	0 - 5/12	choice of system and electrical conductivity in soil
EM	0 - 10	choice of system
tomography	2/4 - 8	borehole depth
mini-slug test	1 - 3	depth of water table and clay layers

Resolution (m) at Kieboom and Koek.

technique	vertical	horizontal
georadar (100 - 200 MHz)	0.5	0.5
EM (10 m coil separation)	none	10
tomography	1	1
mini-slug test	0.5	area sensed \pm 1 meter

Cost indication

The costs of carrying out the measurements (including interpretation) on a site of comparable size and accessibility as Kieboom are summarized in the following table.

Approximated costs of innovative techniques applied on the Kieboom site.

technique	costs (euro)
georadar	4,500.00
electromagnetism	2,300.00
seismic tomography	6,800.00
mini-slug tests ¹	3,200.00

¹ 15 locations with 2 measurements at each location

Conclusions concerning the application of the investigation strategy for the case studies (Kieboom and Mijdrecht)

1. Both georadar and seismic tomography make it possible to discriminate between units with different inclinations, thicknesses and continuities.
2. The measurements can be correlated with the lithology, provided:
 - information obtained by drilling is available;
 - the composition of the formation water is known (EM);
 - interfering objects present on the surface or in the subsurface have been identified (georadar).
3. Quantifying the permeability of the lithostratigraphic units identified from the geophysical investigations is possible only by means of direct measurements, for instance by using mini-slug tests.
4. The methodology applied has made a clear contribution to a better understanding of the heterogeneity of the subsurface.

HOOFDSTUK 1

INLEIDING

1.1 Consortium

Een consortium, bestaande uit het Ontwikkelingsbedrijf Rotterdam (OBR) en de Stichting Bodemsanering NS (SBNS) als eindgebruikers/probleembezoekers, Gemeentewerken Rotterdam Ingenieursbureau (GW) en IWACO Adviesbureau voor water en milieu (IWACO) als adviesbureaus en Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen (NITG TNO) als kennisinstituut, is met NOBIS de uitvoering overeengekomen van het project 'Strategie voor karakterisatie van de hydraulische heterogeniteit van antropogene bodems'.

1.2 Probleemstelling

In Nederland zijn veel locaties met een antropogene bodem verontreinigd. Indien een bodemsanering wordt uitgevoerd op dergelijke locaties is er vrijwel altijd sprake van conventionele saneringstechnieken. Over de mogelijkheid bij deze bodems in site saneringstechnieken toe te passen is tot op heden weinig ervaring opgedaan. Het onderwerp van het project antropogene bodems is gekozen aan de hand van ervaringen in Rotterdam met verontreinigde (haven-)terreinen. Sanering van zulke terreinen werd actueel toen de havenactiviteiten zich naar het westen gingen verplaatsen en de voormalige haventerreinen beschikbaar kwamen voor nieuwe bestemmingen. Deze terreinen bleken vaak bouwrijp te zijn gemaakt met grofkorrelig afvalmateriaal (koolas, sintels enz.) en verontreinigd te zijn met onder andere olieproducten.

Tot op heden bestaat de saneringsvariant vaak uit het afgraven en afvoeren van de verontreinigde grond, hetgeen omvangrijke kosten voor afvoeren, storten of reinigen en aanvoeren van de grond met zich meebrengt. Hiervoor wordt een alternatief gezocht.

1.3 Strategie

In dit project wordt onderzoek uitgevoerd binnen het kader van een strategie voor de sanering van antropogene bodems. Deze strategie is in het schema (zie fig. 1) weergegeven. De strategie bestaat uit de volgende onderdelen:

1. Interpretieren van de beschikbare informatie met betrekking tot de locatie.
2. Opstellen van de hypothese over de bodemopbouw en de verontreinigingssituatie.

In een cyclisch proces:

3. Definiëren van de potentiële saneringstechnieken.
4. Bepalen van de vereiste schaalgrootte voor de te onderzoeken parameters in relatie tot de saneringstechnieken.
5. Selecteren van de meettechnieken in relatie tot de parameters en de schaalgrootte.

Vervolgens:

6. Data-acquisitie.

In een cyclisch proces:

7. Dataverwerking.
8. Construeren van een driedimensionaal beeld van de bodem en de verontreiniging.
9. Met behulp van modellering ontwerpen van de sanering.

Vervolgens:

10. Keuze en implementatie van de (combinatie van) saneringstechniek(en).

Fig. 1. Schema van de strategie.

In de doelstelling is verwoord welk gedeelte van de strategie in dit project wordt doorlopen; in hoofdstuk 7 is hier nader op ingegaan.

1.4 Projectconcept

Een kenmerk van de antropogene bodems, dat belangrijk is indien een in situ sanering wordt beoogd, is het heterogene karakter. Dit uit zich bijvoorbeeld in een - in de ruimte - sterk variërende bodemopbouw, geohydrologische situatie, mobiliteit en sterk wisselende concentraties en locaties van de verontreinigingen. De heterogeniteit van de bodem als procesparameter heeft drie dimensies:

1. heterogeniteit van de hydraulische doorlatendheid van de bodem;
2. heterogeniteit van de locatie en concentratie van de verontreinigingen in de bodem;
3. heterogeniteit van de mobiliteit van de verontreinigingen in de bodem.

Bij toepassing van een uitloogvariant (doorspoeling van de grond met water, al dan niet met toevoegingen) als saneringstechniek zijn alle genoemde soorten heterogeniteit van belang bij het optimaliseren van de sanering. Een saneringsconcept voor antropogene bodems is het concept van in situ sanering door middel van een mobilisatiemethode gecombineerd met biologische afbraak. De beschikbaarheid van de verontreinigingen kan worden vergroot door toevoeging van verschillende media (b.v. solvents of surfactants) aan het grondwater waarmee de bodem wordt doorspoeld. De daarvoor beschikbare verontreinigingen worden biologisch afgebroken; eventueel wordt de afbraak geconcentreerd tot bepaalde zones op de locatie (bioschermen). Het systeem wordt zodanig geoptimaliseerd dat binnen de grenzen van de heterogeen verdeelde verontreiniging op de locatie niet tot op de vierkante meter bekend hoeft te zijn waar de verontreiniging zich bevindt.

1.5 Doelstellingen

Onderzoeksvragen

Bij saneringen is het uitgangspunt voor de terreineigenaar dat deze binnen een acceptabele tijd een bodemgeschiktheidsverklaring krijgt. Het streven is om met behulp van een intensieve sanering de concentratie in de bodem tot beneden de Interventiewaarde terug te brengen. Tevens moet het verloop in een extensieve fase voorspeld kunnen worden.

De hypothese is dat op de onderzoekslocaties de bodem is opgebouwd uit bestanddelen die zowel qua permeabiliteit als qua mobiliteit sterk verschillen. Het gehalte aan PAK en metalen in deze bestanddelen varieert ook sterk. De bodem is verontreinigd met mobiele stoffen, zoals minerale olie en vluchtige aromatische koolwaterstoffen.

De volgende drie onderzoeksvragen kunnen worden geformuleerd:

1. Zijn de permeabiliteit en permeabiliteitsverschillen van een (deel-)locatie met behulp van geofysische technieken ruimtelijk beter te beschrijven dan met behulp van alleen boringen en pompproeven?
2. Is per te onderscheiden bodemsoort met behulp van laboratoriumproeven een voorspelling te doen van het stofgedrag, met name de mobiliteit van bodemvreemde stoffen?
3. Is door combinatie van ruimtelijke beschrijving van de permeabiliteit, mobiliteit en statistische verwerking van gegevens per bestanddeel een betrouwbare voorspelling te doen van het (al dan niet gestimuleerde) uitlooggedrag van de (proef-)locatie als geheel?

Doelstellingen

Het project 'Strategie voor karakterisatie van de hydraulische heterogeniteit van antropogene bodems' richt zich op de eerste onderzoeksvraag.

De doelstelling in het onderzoek is derhalve: *'Het karakteriseren met innovatieve technieken van de hydraulische heterogeniteit van de ondergrond, als basis voor het ontwerp en de dimensionering van de toekomstige in situ sanering'*.

Hierbij wordt gebruik gemaakt van verschillende technieken en methoden. De belangrijkste innovatieve onderdelen voor de karakterisatie van de hydraulische heterogeniteit zijn: *'Het uitvoeren van de bodemkarakterisatie met behulp van geofysische technieken en methoden'*. Hieronder vallen onder meer georadar, elektromagnetische methoden en seismische tomografie. Verder worden mini-slugtests en het graven van sleuven ingezet voor een verfijning van de kennis omtrent de heterogeniteit van de ondergrond.

De kennis, verkregen in dit onderzoek, zal als basis dienen voor de inzet van de verschillende technieken en methoden voor de beschrijving van de hydraulische heterogeniteit op andere (antropogene) locaties.

1.6 **Locatiekeuze**

Voor de uitvoering van het project zijn twee locaties geselecteerd. Het betreft het terrein Kieboom te Rotterdam en het terrein Koek te Mijdrecht. Voor een gedetailleerde beschrijving van de onderzoekslocaties wordt verwezen naar de achtergronddocumenten Kieboom [1 en 2] en Koek [2, 3 en 4].

1.7 **Opbouw van het rapport**

Het rapport is als volgt opgebouwd. In hoofdstuk 2 is de onderzoeksstrategie besproken en in hoofdstuk 3 zijn de gebruikte technieken gepresenteerd. In hoofdstuk 4 is een evaluatie gegeven van het conventionele veldwerk op de locatie Kieboom, waarna in hoofdstuk 5 voor de cases Kieboom en Koek de resultaten van de toepassing van de innovatieve technieken zijn besproken. In hoofdstuk 6 worden de innovatieve technieken geëvalueerd en in hoofdstuk 7 is de toepassing van de onderzoeksstrategie op de case Kieboom besproken. Ten slotte zijn in hoofdstuk 8 de conclusies gegeven.

HOOFDSTUK 2

ONDERZOEKSSTRATEGIE

2.1 Inleiding

De hoofddoelstelling van het onderhavige project is het verkrijgen van inzicht in de heterogeniteit van de ondergrond. Informatie over de geo(chemische) en hydraulische heterogeniteit is essentieel bij de toepassing van in situ saneringstechnieken.

De kritische parameters bij de toepassing van in situ varianten zijn:

- transport van verontreinigingen in de ondergrond;
- potentieel voor natuurlijke afname van de concentratie in de bodem.

Voor informatie over de tweede parameter wordt verwezen naar NOBIS-projecten, waarin in situ sanering en monitoring van BTEX, naftaleen en CKW is onderzocht.

Transport van verontreiniging in de verzadigde zone wordt bepaald door diffusie, dispersie en natuurlijke grondwaterstroming. Tijdens de sanering wordt het transport beïnvloed door onttrekking en/of infiltratie. Door inzicht in de hydraulische heterogeniteit te verkrijgen, kunnen de preferente stroombanen worden gekarteerd en kunnen de onttrekkings- en infiltratiedebieten worden gedimensioneerd.

Natuurlijke afname van de concentratie hangt af van de transportprocessen, sorptie-eigenschappen van de bodem en de mogelijkheden voor bacteriële afbraak.

In dit project zijn de meettechnieken voor het bepalen van de hydraulische heterogeniteit onderzocht. De technieken voor de bepaling van geochemische en biologische heterogeniteit van de bodem worden niet behandeld. Informatie over hydraulische heterogeniteit kan echter worden gebruikt voor de locatie van potentiële 'reactieve' lagen (klei, veen). Transportsnelheid in deze lagen bepaalt de contacttijd van de verontreiniging met reactieve componenten en daarmee de kinetiek van de chemische reacties.

De keuze van meettechnieken voor het bepalen van de hydraulische heterogeniteit is onder meer afhankelijk van de vereiste mate van detail (schaalgrootte).

De onderzoeksstrategie, toegepast voor het bepalen van de hydraulische heterogeniteit, omvat in principe 2 stappen:

1. specificatie van de gegevens die nodig zijn voor de beschrijving van kritische parameters;
2. opstellen van de methodologie om de gewenste gegevens te genereren.

2.2 Specificatie van de te genereren gegevens

De gegevens moeten een bijdrage leveren aan het bepalen van de positie van de verontreiniging voor, tijdens en na de sanering. In alle gevallen moet minimaal de globale lithostratigrafie van de ondergrond bekend zijn. Hieronder wordt verstaan: de ruimtelijke opeenvolging en samenstelling van de verschillende bodemlagen. De indeling in zand-, klei- of veenlagen geeft een eerste indicatie over de positie van de doorlatende en weerstandbiedende zones in de ondergrond. De uiteindelijke doorlatendheid van de lithostratigrafische zones wordt bepaald door korrelgrootte en korrelgrootteverdeling, vorm van de korrels, laagopbouw, mate van compactie en aanwezigheid van bijmengingen en antropogeen materiaal.

Om het transport en de positie van de verontreiniging in de ondergrond te bepalen zijn de volgende gegevens nodig:

- verticale begrenzing van de lagen (diepte en dikte);
- horizontale begrenzing van de lagen (continuïteit);
- doorlatendheid (k) en weerstand (c) van respectievelijk zand-, klei- of veenlagen.

De karakterisatiemethodiek voor het bepalen van de hydraulische heterogeniteit is dus gericht op het vaststellen van de ruimtelijke (driedimensionale) verbreiding van goed en slecht doorlatende zones en op het bepalen van de variabiliteit in doorlatendheden binnen de onderscheiden zones.

2.3 Methodologie

De volgende stappen worden onderscheiden die in chronologische volgorde (*gedeeltelijk* in een iteratief proces) worden doorlopen (zie fig. 2):

1. inventarisatie van de beschikbare informatie;
2. hypothese van de bodemsamenstelling en de verontreiniging;
3. selectie van de technieken voor acquisitie van aanvullende gegevens;
4. data-acquisitie;
5. databewerking en integratie van de resultaten.
6. keuze en implementatie van de saneringstechniek.

2.3.1 *Inventarisatie van de beschikbare informatie*

Algemene informatie omtrent de bodemopbouw op een saneringslocatie wordt verkregen uit eerder verrichte onderzoeken en kaarten en uit historisch onderzoek op de locatie. Dit laatste is belangrijk voor indicaties over de aanvoer van antropogeen materiaal. Kwantitatieve gegevens over samenstelling van de bodem, grondwaterstanden en doorlatendheden op het terrein worden verkregen uit bestaande boringen en sonderingen.

2.3.2 *Hypothese van de bodemsamenstelling en de verontreiniging*

Interpretatie van de gegevens uit het vooronderzoek vormen de basis voor de hypothese over de bodemsamenstelling en de verontreiniging. De onderzoeksdoelen worden in dit stadium geformuleerd.

2.3.3 *Cyclisch proces: saneringstechnieken, schaalgrootte en meettechnieken*

De hypothese van de bodemsamenstelling en de verontreiniging geeft de richting aan van het uit te voeren onderzoek: afhankelijk van de schaal van de sanering en mogelijke saneringstechnieken worden bruikbare en doelmatige meettechnieken geselecteerd. Aangezien de uitkomsten van de metingen kunnen leiden tot aanpassing van de schaal en de toe te passen saneringstechnieken, is in principe sprake van een iteratief proces, hetgeen in figuur 2 tussen de stippellijnen is weergegeven. De technieken voor het bestuderen van de bodemopbouw kunnen globaal worden ingedeeld in:

- destructieve, zoals boor- en graaftechnieken en sondeertechnieken, waarbij het bodemmateriaal visueel kan worden geïnspecteerd of *in situ* metingen worden uitgevoerd;
- niet-destructieve, zoals geofysische methoden, waarbij de ondergrond vanaf het aardoppervlak wordt bestudeerd.

De gegevens, verkregen met destructieve technieken, zijn meestal puntwaarnemingen die alleen representatief zijn voor de directe omgeving van een meetpunt. Niet-destructieve technieken, daarentegen, produceren continue waarnemingen, zowel in het verticale als in het horizontale vlak. De meettechnieken kunnen verder worden verdeeld in *in situ* technieken, zoals

pompproef en tracertests, en laboratoriumtechnieken, zoals korrelgrootte-analyses en kolomproeven.

Fig. 2. Schema van de strategie.

De uiteindelijke selectie van de technieken hangt af van de volgende factoren:

- gewenste resolutie;
- bereikbaarheid op de locatie;
- aanwezige storingen op het terrein;
- kosten (tijd) voor uitvoering en interpretatie.

2.3.4 *Selectie van technieken voor acquisitie van aanvullende gegevens*

Voor de geohydrologische karakterisatie zijn de volgende conventionele technieken toegepast:

Grondboringen, steekbusboringen, sonderingen en sleuven graven

Deze technieken behoren tot de standaardtechnieken uit de milieu- en geotechniek en het grondwerk, en worden daarom niet nader toegelicht.

Voor de geohydrologische karakterisatie zijn de volgende innovatieve technieken toegepast:

Georadar en elektromagnetische meetmethoden

Door middel van deze geofysische technieken wordt vanaf het oppervlak een kwalitatief beeld verkregen van de zones van de relatief geohydrologisch homogene gebieden binnen deze locatie. Voor een beoordeling van de hydraulische eigenschappen van de verschillende onderscheiden zones zijn in het algemeen aanvullende metingen met andere technieken (b.v. boringen of mini-slugtests) nodig.

Mini-slugtests

Door middel van het uitvoeren van mini-slugtests worden, op een geringe ruimtelijke schaal, relatieve doorlatendheidsverschillen aangetoond. Ook wordt een richtwaarde voor de doorlatendheid bepaald. De toepassing van mini-slugtests in het deelgebied is bedoeld om de verschillen in doorlatendheid in het horizontale vlak in kaart te brengen.

Seismische tomografie

Seismische tomografie is een methode voor het in kaart brengen van geologische structuren in de ondergrond. Hierbij wordt een driedimensionaal beeld verkregen van de structuur van de ondergrond en derhalve van de zones met verschillen in hydraulische eigenschappen. De seismische tomografie dient om de bodemopbouw en continuïteit van verschillende bodemlagen binnen het deelgebied in beeld te brengen. Tevens kan aan de hand van de tomografie een globale indicatie worden verkregen over de variatie in hydraulische doorlatendheid.

De gegevens, die met dit onderzoek zijn gegenereerd, zijn onder te verdelen in kwalitatieve en kwantitatieve gegevens en tevens in gedetailleerde (meterschaal) en grootschalige metingen (decameterschaal).

2.3.5 *Data-acquisitie*

De principes van de technieken, die zijn gebruikt in het huidige project, zijn beschreven in hoofdstuk 3.

Vele technieken zijn ontwikkeld en toegepast voor doeleinden die wezenlijk anders zijn dan bij de bodemverontreinigingsproblematiek. Vooral de schaal en mate van detail verschilt. Een bijkomend aspect bij de antropogene bodems is de aanwezigheid van objecten (metaal, beton) die de metingen kunnen verstoren. Het is vaak nodig het oorspronkelijke meetplan (grid) tijdens het veldwerk aan te passen. Ook de interpretatie van de metingen kan afwijken van de standaardprocedures.

2.3.6 *Databewerking en integratie van de resultaten*

Dimensionering van de sanering geschiedt op basis van een conceptueel (reken)model. Dit model gaat uit van de bevestigde of bijgestelde hypothese over bodem en verontreiniging alsmede het ontwerp van de sanering. De input hiervoor wordt geleverd door de verzamelde data. Aangezien de uitkomsten van de berekeningen kunnen leiden tot aanpassing van de dimensionering, is in principe sprake van een iteratief proces, hetgeen in figuur 2 tussen de stippellijnen is weergegeven.

Data-acquisitie op een saneringslocatie levert zowel kwalitatieve als kwantitatieve informatie. De niet-destructieve technieken leveren kwalitatieve ruimtelijke informatie over de heterogeniteit van de ondergrond. Kwalitatief omdat de gegevens zijn uitgedrukt in verschillen in reflecties, maar niet in geo(chemische) of hydraulische parameters. De heterogeniteit kan de variaties in de lithologie en doorlatendheid weerspiegelen, maar kan ook veroorzaakt zijn door verschillen in de samenstelling van het water, aanwezigheid van antropogene objecten en/of oppervlaktestoringen. De destructieve technieken leveren kwantitatieve gegevens van de doorlatendheid, maar deze 'harde data' hebben een beperkte ruimtelijke betekenis. Een combinatie van continue gegevens en puntgegevens kan de gewenste kwantitatieve ruimtelijke informatie omtrent de hydraulische heterogeniteit van de bodem verschaffen.

2.3.7 *Keuze van de saneringstechnieken*

De kwantitatieve ruimtelijke informatie over de hydraulische heterogeniteit bepaalt, samen met de aard, de mate en omvang van de verontreiniging, de bestemming van de locatie, de hieruit voortvloeiende risicobeoordeling en het programma van eisen van de eindgebruiker, de keuze van de saneringstechniek. De locatiedelen waar in situ sanering technisch haalbaar is, zijn geïdentificeerd evenals de locatiedelen waar vanwege de geringe doorlatendheid geen beïnvloeding van de mobiele fractie mogelijk is.

Het programma van eisen van de eindgebruiker en de mogelijkheden die het bevoegd gezag biedt, bepalen welke saneringstechniek wordt gekozen.

BESCHRIJVING VAN DE TOEGEPASTE TECHNIEKEN

3.1 Principes innovatieve technieken

3.1.1 Georadar

Radargolven zijn elektromagnetische golven die door een zendantenne worden uitgezonden en door een andere antenne, de ontvangantenne, worden ontvangen (zie achtergronddocument geofysisch onderzoek [1]). Het radaronderzoek binnen het onderhavige project is uitgevoerd met antennefrequenties van 50 MHz en 200 MHz. Op grensvlakken tussen lagen met contrasterende elektrische eigenschappen wordt een deel van de golfenergie gereflecteerd, terwijl de resterende energie haar weg vervolgt en deels weer door een dieper reflecterend grensvlak wordt gereflecteerd. De golven worden aan het oppervlak door de ontvangantenne opgevangen en, na versterking door de ontvanger, geregistreerd en opgeslagen in het meetsysteem. De reflecties worden afgebeeld in radar(echo)grammen, waarin op elke meetpositie langs een spoor de binnengekomen reflecties tegen de reistijd worden weergegeven. De 0-tijd valt in de praktijk samen met de eerste aankomst van de radargolven die niet zijn gereflecteerd maar direct door de lucht van zend- naar ontvangantenne gaan. Deze pulsen vormen een zwarte band langs de bovenzijde van het radargram.

Reflectie vindt niet alleen plaats op vlakken, maar ook op objecten van beperkte omvang in de ondergrond. Reflecties op kleine gebogen vlakken en op kleine ronde lichamen, die als puntbron werken, worden diffracties genoemd en zijn herkenbaar in radarechogrammen aan hyperbolische vormen. Diffractie-hyperbolen vormen storingen die over een grote breedte een radargram kunnen beïnvloeden en vanwege interferentie met reflectoren verwarring kunnen teweegbrengen bij de interpretatie. Daarbij komt dat diffractie-hyperbolen niet alleen worden veroorzaakt door lichamen in de ondergrond, maar ook kunnen ontstaan aan voorwerpen aan of boven het oppervlak. In principe kan de amplitude van signalen, veroorzaakt door voorwerpen aan het oppervlak, worden verminderd door afscherming van de antennes. Echter bij toepassingen met relatief lage frequenties, zoals in dit project gebeurd is om voldoende penetratie te krijgen, wordt de afscherming dermate groot dat de gehele meetopstelling onhandelbaar wordt. Dat is een belangrijke reden waarom de fabrikant van de in dit project gebruikte apparatuur geen afscherming aanbrengt op de laagfrequente antennes. Antennes met hogere frequenties kennen vaak wel afscherming maar hebben een geringere penetratiediepte (zie hierna). Verder is het zo dat de afscherming een nadelige uitwerking kan hebben op de kwaliteit van het meetsignaal.

De mate van reflectie aan een grensvlak wordt bepaald door het contrast in de diëlektrische constante (ϵ) van de lagen aan weerszijden van het grensvlak. Enkele karakteristieke waarden van ϵ voor natuurlijke media zijn vermeld in tabel 1. De voortplantingssnelheden van radargolven (uitgedrukt in cm per nanoseconde; $1 \text{ cm/ns} = 10^7 \text{ m/s}$) verhouden zich omgekeerd evenredig met de diëlektrische constante. Het grote contrast in ϵ tussen droge en met water verzadigde zanden maakt dat de grondwaterspiegel een goede reflector is van radargolven. Ook veen, waarvan de diëlektrische constante die van water benadert, contrasteert sterk met andere afzettingen en vormt een zeer goede reflector. De diëlektrische constante van kleien varieert; dit verklaart gedeeltelijk waarom kleien op sommige locaties wel en op andere niet in radaropnamen zichtbaar zijn.

Doordringing en resolutie van radargolven

Een andere elektrische parameter, namelijk de elektrische weerstand (ρ) heeft grote invloed op de demping van radargolven en dus op de exploratiediepte die met georadar kan worden bereikt. Met afnemende weerstand neemt de demping toe en daarmee neemt de penetratiediepte af. De mate van demping wordt uitgedrukt door de dempingsfactor α (in dB/m); karakteristieke waarden zijn vermeld in tabel 1.

De doordringingsdiepte hangt ook af van de frequentie van de radargolven; hoe lager de frequentie, des te groter het doordringingsvermogen. Deze toename in de exploratiediepte gaat echter ten koste van een vermindering van de resolutie.

Tabel 1. Karakterisatie van fysische eigenschappen van voor georadar belangrijke media [1].

medium	diëlektrische constante ϵ	voortplantingssnelheid v (cm/ns)	demping α (dB/m)
lucht	1	30	0
droog zand	4	10 - 15	0,01
waterverzadigd zand	25	6	0,03 - 0,3
kleien	5 - 40	4,7 - 13	1 - 300
veen	65	3,7	0,3
water (zoet)	80	3,4	0,1
water (zout)	80	3,4	1000

Zoals reeds is genoemd, is, naast de reflecties en diffracties, de directe golf het belangrijkste signaal in de radargrammen. Dit is het bovenste sterke signaal in de radargrammen. Het is een interferentiesignaal van twee of drie golven:

1. de directe golf door de lucht (snelheid 30 cm/ns);
2. de directe golf door de bodem boven de grondwaterspiegel (snelheid droog zand: 15 cm/ns);
3. indien de waterspiegel voldoende ondiep is (binnen een golflengte) de directe golf door de bodem onder de grondwaterspiegel (snelheid 6 cm/ns).

Daarbij moet niet alleen worden gedacht aan verschillende looppaden van de golven, maar meer aan de situatie dat de looptijd van zender naar ontvanger wordt beïnvloed door de eigenschappen van de verschillende materialen die zich binnen een golflengte van de antennes bevinden. De golflengte in het droge zand bedraagt 3 m voor de 50 MHz antenne en 0,75 m voor de 200 MHz antenne. Voor de 50 MHz gegevens geldt derhalve dat er in ieder geval sprake is van de interferentie van de drie genoemde golven. Bij de 200 MHz gegevens is dat veel minder of niet het geval.

3.1.2 Elektromagnetische technieken

Elektromagnetische metingen (zie achtergronddocument geofysisch onderzoek [1]) worden verricht met twee spoelen: een zend- en ontvangspoel, die via een kabel met elkaar verbonden zijn. De spoelen worden in hetzelfde (horizontale of verticale) vlak geplaatst (zie fig. 3).

Door de zendspoel wordt een wisselstroom met een bepaalde frequentie gestuurd, waardoor een primair magnetisch veld wordt opgewekt. Dit magnetische veld induceert stromen in de ondergrond. Deze stromen, waarvan de sterkte afhangt van de soortelijke geleiding van de ondergrond, wekken op hun beurt een secundair magnetisch veld op. De ontvangspoel ontvangt dit secundaire (en ook het primaire) veld. Dit secundaire magnetische veld hangt dus af van de soortelijke geleiding van de ondergrond, maar ook van de frequentie van het zendsignaal en de

spoelafstand, en is in het algemeen een ingewikkelde functie van deze variabelen. Onder bepaalde voorwaarden, gedefinieerd als 'operation at low induction numbers' en verwerkt in het ontwerp van het instrument dat gebruikt is in deze studie, de EM-34 van Geonics, wordt deze functie sterk vereenvoudigd en wel zodanig dat voor een homogene bodem de verhouding tussen het secundaire en primaire veld evenredig is met de soortelijke geleiding van die half-ruimte. De EM-34 geeft dan ook direct deze soortelijke geleiding aan die schijnbare geleiding wordt genoemd. De schijnbare geleiding is een gewogen gemiddelde van de soortelijke geleidingen in de ondergrond. Als vuistregel geldt dat de doordringingsdiepte voor verticale spoelen 0,75 en voor horizontale spoelen 1,5 maal de spoelafstand is.

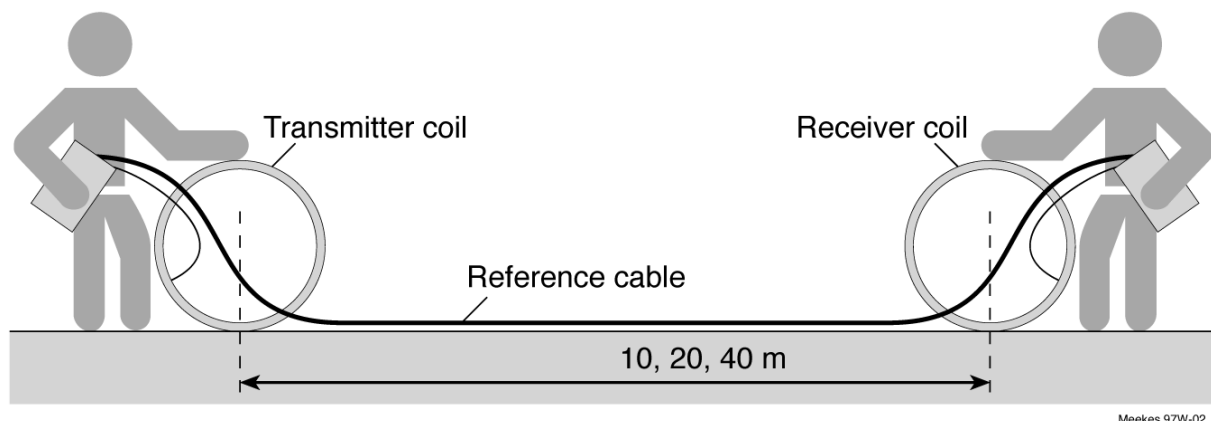


Fig. 3. Opstelling van elektromagnetische metingen.

3.1.3 Seismische tomografie

Seismische tomografie (zie achtergronddocument seismische tomografie [3]) 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. 4).

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

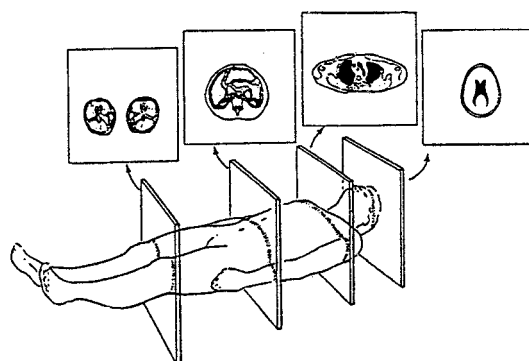


Fig. 4. Toepassing van de tomografie in de geneeskunde.

In figuur 5 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. Ook kunnen geofoons aan het oppervlak worden toegepast.

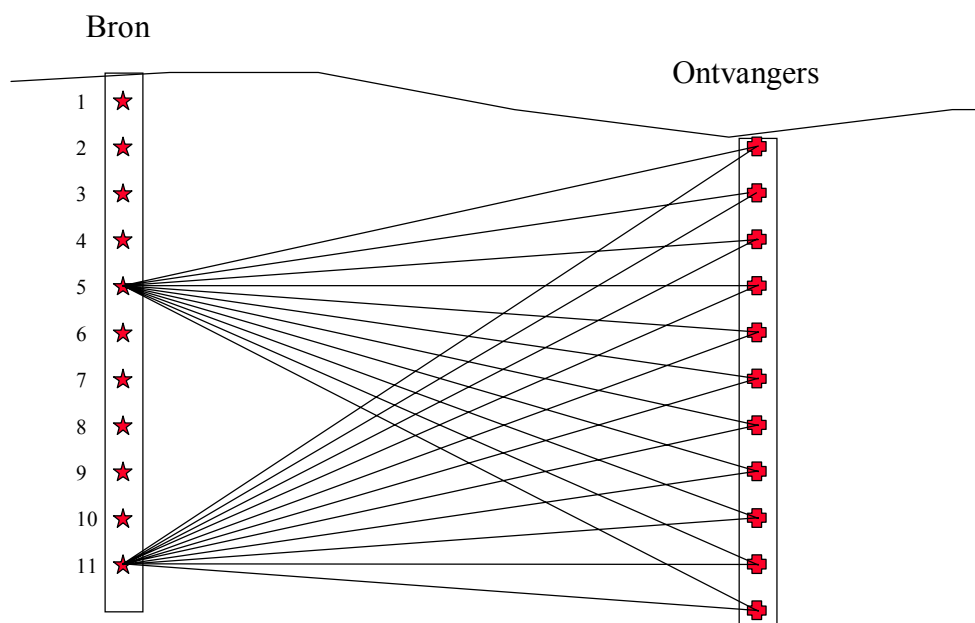


Fig. 5. Schematische weergave van een cross-hole seismische meting.

Met de seismische bron kunnen seismische golven worden opgewekt die door de specifieke opbouw van de ondergrond op de laagscheidingen tussen de verschillende lithologische eenheden (b.v. zand-klei) afbuigen, breken en dempen. De signalen van de seismische golven worden 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.

Uit de aankomstsignalen worden twee parameters gehaald:

1. de eerste aankomsttijd;
2. de amplitude van de eerste aankomst.

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 verondersteld wordt.

3.1.4 *Mini-slugtest*

In een slugtest (zie achtergronddocument mini-slugtest [4]) wordt een klein volume (slug) water onttrokken uit de put en worden vervolgens de veranderingen (stijging) van het waterniveau in de put gemeten als functie van de tijd. Ook kan de verandering van het waterniveau in de put worden veroorzaakt door het extra toevoegen van een klein volume water. Daarna wordt de daling van het waterniveau gemeten. Uit de curve, die de veranderingen van het waterniveau in de tijd weergeeft, wordt de doorlatendheid bepaald.

De mini-slugtest (zie fig. 6) is een slugtest alternatief uitgevoerd in een 1 inch ijzeren pijp, voorzien van een 0,25 m lang filter. De veranderingen van het waterniveau worden verkregen door onderdruk te creëren met een vacuümpomp. Deze methode wordt in dit rapport vacuümtest genoemd. Een alternatief voor een vacuümtest is een zogenoemde 'onttrekkingstest', waarbij aan de bovenzijde van de filterbuis grondwater wordt onttrokken en een zogenoemde 'additietest', waarbij water wordt toegevoegd.

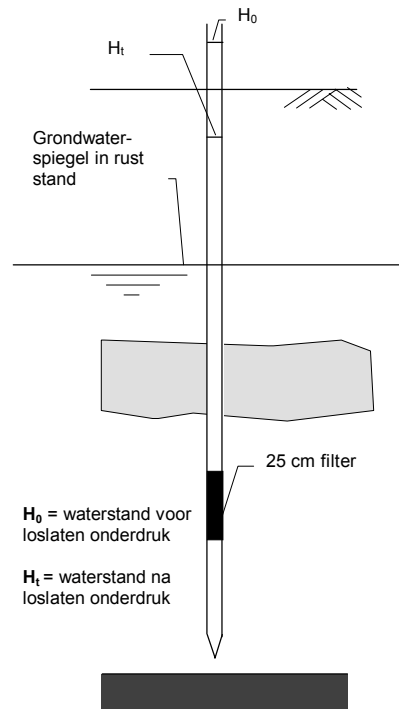


Fig. 6. Principe van slugtests.

Doordat metingen op iedere diepte vanaf 50 cm beneden de grondwaterspiegel mogelijk zijn, kan een gedetailleerd verticaal profiel van doorlatendheden worden verkregen. In de horizontale richting kunnen de tests worden uitgevoerd op zeer korte afstand van elkaar, zodat ook lateraal een gedetailleerd beeld kan worden verkregen. De tests kunnen worden gecombineerd met sonderingen, bodemmonsters en geofysische meetmethoden. Daarmee kunnen preferente transportroutes in kaart worden gebracht. Dit maakt de techniek zeer geschikt voor saneringsonderzoek waarin inzicht in de heterogeniteit van de bodem zeer belangrijk is.

Een prototype van de apparatuur voor mini-slugtests werd ontwikkeld en getest binnen het NOBIS-onderzoeksproject HYDRAKAR. De resultaten zijn beschreven in het TNO-rapport NITG 97-49-B [2]. Bijlage L toont foto's van data-acquisitie. Voor de interpretatie van de, uit een mini-slugtest, verkregen gegevens is tijdens dit onderzoek de Bouwer & Rice-methode gebruikt. Een evaluatie en bronverwijzing van deze methode zijn beschreven in het bovengenoemde TNO-rapport [2].

EVALUATIE CONVENTIONEEL BODEMONDERZOEK OP HET KIEBOOM-TERREIN

4.1 Inleiding

In het conventionele onderzoek, dat in 1996/1999 in combinatie met het NOBIS-project 'antropogene bodems' is uitgevoerd [5], is geconstateerd dat de verontreinigingssituatie sterk afwijkt van die welke in 1992 aanleiding gaf de locatie Kieboom als projectlocatie te selecteren. Naar aanleiding hiervan is de vraag gesteld of op basis van de gronden, waarop de locatie Kieboom is geselecteerd, voorzien had kunnen worden dat de locatie niet voldoet aan de verwachtingen en of hier een leereffect van kan uitgaan.

Het project is wel op het Kieboom-terrein afgerond teneinde een vergelijking van de technieken, toegepast op dezelfde locatie, te kunnen uitvoeren.

Deze evaluatie heeft het volgende doel: een vergelijking te maken tussen de gegevens die voor 1995 zijn verzameld en de gegevens die in 1996/1998 beschikbaar zijn gekomen.

4.2 Locatiekeuze Kieboom-terrein

Het onderwerp van het project 'antropogene bodems' is gekozen aan de hand van ervaringen in Rotterdam met verontreinigde (haven-)terreinen die in het verleden bouwrijp zijn gemaakt met grofkorrelige materialen. Deze terreinen blijken vaak bouwrijp te zijn gemaakt met grofkorrelig afvalmateriaal (koolas, sintels enz.) en verontreinigd te zijn met onder andere olieproducten.

Het Kieboom-terrein is in 1995 geselecteerd op basis van een zestal factoren:

1. het maakt deel uit van het voormalige bedrijventerrein Kop van Zuid, waarop sinds 1890 allerlei bedrijvigheid heeft plaatsgevonden;
2. op de locatie is eerst een kolenopslag-, kolenoverslagbedrijf en kolenverkooppunt en later een oliehandel/benzinestation gevestigd geweest;
3. volgens bodemonderzoek uit 1987 en 1992 is het terrein fysiek verontreinigd met koolas, puin, sintels (grofkorrelige materialen) en chemisch verontreinigd met minerale olie, PAK en BTEX;
4. het terrein ligt braak en zal volgens de planning pas na 2000 worden bebouwd;
5. de aard van de verontreinigingen is zodanig dat een biologische in situ variant kansrijk wordt geacht;
6. in 1996 vindt op het terrein een aanvullend nader onderzoek plaats, waarmee het NOBIS-project kan worden gecombineerd.

4.3 Herkomst van de basisinformatie

De kennis over het terrein, die ten grondslag lag aan de locatiekeuze, is afkomstig uit de volgende bronnen:

- nader bodemonderzoek naar de algehele kwaliteit van het Emplacementsterrein uit 1992 [6];
- nader bodemonderzoek Kieboom-terrein uit 1992 [7];
- sanering NS-Emplacement fase C en D uitgevoerd in 1995 [8].

De belangrijkste conclusies zijn indertijd ontleend aan het 'Nader onderzoek Kieboom' [7]:

Historisch onderzoek

Volgens eerdere onderzoeken zijn in de zandige toplaag puin en slakken aangetroffen. In het grondwater is 41.000 µg/l minerale olie aangetroffen.

In de jaren '50 was op de locatie nog een steenkolenhandel gevestigd, later zijn in verband met de vestiging van een oliehandel tanks ingegraven en na enige jaren ook weer verwijderd.

Het terrein (oorspronkelijk weiland) is in de loop van de eeuw enige malen opgehoogd en verhard, zodat het maaiveld aanzienlijk is verhoogd en de antropogene bodem bestaat uit een 'lasagne'-achtige laag van klei-, zand- en koolas/slakkenlagen, met gedeeltelijk nog bestaande verhardingslagen ertussen.

Veldwerk

In vrijwel alle boringen is puin aangetroffen en in een groot aantal boringen ook kolengruis en/of (metaal-)slakken. Tevens is zintuiglijk een verontreiniging met minerale olie geconstateerd.

Chemische analyses

In de grond zijn concentraties variërend van 135 tot 3.800 mg/kg aangetroffen, in het grondwater 660 tot 29.000 µg/l minerale olie en 43 tot 18.000 µg/l BTEX.

In het 'Nader onderzoek naar de algehele kwaliteit' [6] zijn ook chemische analyses van PAK opgenomen:

De concentraties PAK in monsters waarin puin, koolas en/of slakken zijn aangetroffen, variëren van 0,79 tot 259,5 mg/kg.

Volgens beide onderzoeken en een oriënterend onderzoek uit 1987 loopt door het Kieboomterrein een zogenoemde 'ontwateringskil' die is gedempt en voorheen aansloot op de, eveneens gedempte, Spoorweghaven. Er zijn sterke aanwijzingen dat de kil is gedempt met koolashoudende grond.

Bij de sanering van het aangrenzende terrein (Saneringsverslag NS-Emplacement [8]), nu Laan op Zuid, zijn op de grens met het Kieboomterrein aanzienlijke pakketten koolas, verontreinigd met minerale olie, aangetroffen. Deze koolas- en metaalslakken zijn gebruikt om de voormalige ontwateringskil te dempen, aldus is tijdens de sanering gebleken. In de ontgraven partijen zijn concentraties minerale olie en PAK aangetroffen van respectievelijk 520 - 4.000 mg/kg en 1,6 - 71 mg/kg. In het onttrokken grondwater varieerden de concentraties minerale olie, PAK en BTEX van respectievelijk < 50 tot 40.000, < 0,3 tot 47 en < 1,0 tot 28 µg/l.

De locatie is gelegen in een depressie tussen een viertal hoger gelegen taluds en is droog gehouden met behulp van drainage en bemaling.

4.4 Uitkomsten van het ANO-1996

Het terrein heeft ten opzichte van de situatie in 1991/1992 een bestemmingswijziging ondergaan: tijdens het NO-1992 was het terrein nog als benzineverkooppunt in gebruik. In 1995, voor de start van het NOBIS-project, is het bedrijf op deze locatie gestopt en zijn de verharding, de pompeilanden en -installaties en de opstallen verwijderd in verband met de sanering van het aangrenzende terrein en de aanleg van de Laan op Zuid. Sindsdien ligt het terrein braak; het oppervlak biedt grotendeels een zandige aanblik. De drainage is afgekoppeld. Een tekening van de locatie is opgenomen als bijlage A.

In het ANO-1996 is het volgende gebleken:

- aanvullend historisch onderzoek heeft aan het licht gebracht dat de ontwateringskil ter plaatse van het Kieboom-terrein later is gedempt dan de kil ter plaatse van het Emplacementsterrein en dat *geen* koolas/sintels maar zand is toegepast;
- de concentraties verontreiniging binnen de getekende contouren zijn veel geringer dan op grond van de C-contouren uit 1992 is aangenomen;
- de boringen, waarin kolengruis en dergelijke is aangetroffen, zijn geringer in aantal;
- de ruimtelijke verspreiding van zowel de grovere bestanddelen als de verontreinigingen is geringer en heterogener van aard dan uit het NO-1992 is geïnterpreteerd;
- bij inspectie van een tweetal proefgaten is gebleken dat er wel koolas-/sintellagen aanwezig zijn doch dat deze een geringe dikte (< 10 cm) hebben.

In bijlage B zijn een foto en een gedetailleerde beschrijving van één van de boringen opgenomen. In bijlage C is een bodemprofiel, samengesteld van een aantal boringen, opgenomen.

4.5 Vergelijking

Er is een vergelijking gemaakt tussen de hoeveelheid boringen in 1992 waarin kolengruis, slakken en puin zijn aangetroffen en de hoeveelheid boringen met dezelfde karakteristiek in 1996. De vergelijking is beperkt tot die boringen die binnen de contouren van het radartraject liggen.

Het blijkt dat door de Argus-onderzoekers vaker koolas en sintels zijn gedetecteerd (58 %) dan door de GW-onderzoekers (16 %). Door de Argus-onderzoekers is ook vaker puin gedetecteerd (68 %) dan door de GW-onderzoekers (48 %) doch het verschil is minder groot.

Geconcludeerd is dat de Argus-onderzoekers in 1992 meer *en detail* hebben beschreven dan de GW-onderzoekers in 1996. Een verklaring hiervoor is:

1. dat GW-onderzoek op reststoffen koolas, gruis, sintels enzovoorts heeft aangetoond dat voor uitlooeigenschappen op de lange termijn het in het algemeen te weinig verschil maakt met welke variëteit men van doen heeft, zodat de koolassen minder gedetailleerd zijn beschreven;
2. dat incidentele laagjes kleiner dan 10 cm niet apart worden beschreven in verband met de geringe invloed op het verontreinigingsbeeld; alleen indien aan deze laagjes een verdachte geur is waargenomen, zijn zij *wel* apart beschreven.

In 1992 en in 1996 zijn grondmonsters en grondwatermonsters geanalyseerd. In 1996 zijn om drie redenen aanzienlijk meer monsters geanalyseerd, omdat:

1. de verwachting was dat het terrein behoorlijk vervuild is;
2. overwogen is dat extra analyses meer zekerheid geven over de saneringsgrenzen dan zintuiglijk bepaalde grenzen en de kosten ervan ruimschoots opwegen tegen de kosten van extra ontgraving;
3. de analyses in 1996 veel goedkoper zijn dan in 1992.

Ter vergelijking zijn in tabel 2 de resultaten ten opzichte van de toetsingscriteria gegeven.

Tabel 2. Resultaten ten opzichte van de toetsingscriteria.

grond	aantal monsters	< A/S	> A/S, < B/T	> B/T, < C/I	> C/I
NO-1992	15	9	4	2	0
ANO-1996	41	23	13	3	2
grondwater	aantal monsters	< A/S	> A/S, < B/T	> B/T, < C/I	> C/I
NO-1992	19	0	9	2	8

ANO-1996	20	1	16	1	2
----------	----	---	----	---	---

Uit de resultaten van de chemische analyses is geconcludeerd dat de omvang van de verontreinigingen, die vooral gestoeld is op de grondwaterresultaten, aanzienlijk geringer is dan in het NO-1992 is beschreven.

4.6 Conclusies

De karakterisatie van het Kieboom-terrein, voorafgaande aan het NOBIS-project, is gestoeld op de volgende interpretaties:

- gegevens van historisch onderzoek over het terrein in het NO-1992;
- zintuiglijke karakterisatie in het NO-1992;
- beschrijving van de verontreinigingssituatie in het NO-1992;
- extrapolatie van saneringsgegevens uit 1995 van het naastliggende terrein.

In vergelijking tot het NO-1992 is in 1996 in veel geringere mate zintuiglijk waarneembare en chemisch detecteerbare verontreiniging aangetroffen dan in 1992. De verontreinigingsomvang, afgeleid van de resultaten van chemische analyses, is derhalve veel geringer dan in 1992 nog werd aangenomen.

Geconcludeerd is dat::

- in antropogene bodems niet met zekerheid verontreinigingscontouren kunnen worden bepaald op grond van interpolatie van grondmonstergegevens;
- in antropogene bodems de interpretatie van de verontreinigingssituatie moet geschieden vanuit een procesbenadering in plaats vanuit een contourenbenadering.

HOOFDSTUK 5

CASE STUDIES

5.1 Case Kieboom

5.1.1 Locatiebeschrijving en hypothese

De onderzoekslocatie Kieboom te Rotterdam (zie bijlage A) heeft een oppervlakte van circa 1 ha. De locatie wordt gekenmerkt door een antropogene bodem, bestaande uit siltige en zandige ophooglagen, mogelijk vermengd met grove ophoogmaterialen, opgebracht op een oorspronkelijk maaiveld van humeuze klei op veen. Op de locatie is een kil aanwezig die, volgens historische informatie, gedempt zou zijn met zand en koolas, slakken, puin en sintels. De bodem zou zijn verontreinigd met diesels, benzine en PAK. Het terrein ligt sinds 1996 braak en is derhalve goed toegankelijk voor onderzoek.

5.1.2 Bodemopbouw en zintuiglijke verontreinigingen

Vanaf het maaiveld (NAP + 1,9 à 3,2 m) tot circa 1,6 meter beneden het maaiveld (m-mv) is licht siltig zand aangetroffen met bijmengingen van puin en/of koolas (zie bijlage B en C). Onder het zand is een licht zandige, humeuze kleilaag aangetroffen. Vanaf circa 6,5 m-mv (NAP - 4,5 m) bestaat de bodem uit veen tot circa 11 m-mv (NAP - 8,0 m). Dieper is humeuze klei waargenomen.

Uit de analyseresultaten van de grondwatergegevens uit het ANO/SO uit 1996 blijkt dat de verontreiniging veel geringer is dan op basis van het tijdens het opstellen van het projectvoorstel beschikbaar onderzoek (in 1992 uitgevoerd) mocht worden aangenomen. In hoofdstuk 2 is hier nader op ingegaan.

5.1.3 Interpretatie '98: boringen

Ter plaatse van de mini-slugtests zijn zes handboringen gemaakt; aan monsters van het niveau waarop de mini-slugtests zijn uitgevoerd, zijn korrelgrootte-analyses verricht. Tevens is ook CaCO₃ en organische stof bepaald.

Zintuiglijk waargenomen afwijkingen van de gebruikelijke bodemopbouw bestaan uit puin en koolas. In tabel 3 zijn de zintuiglijk waargenomen verontreinigingen weergegeven.

Tabel 3. Zintuiglijke waarnemingen van de boringen.

boring	diepte (m-mv)	diepte (NAP)	textuur	zintuiglijke verontreiniging
200	0,00 tot 0,60	+2,73 tot +2,13	siltig zand	licht puin
	0,60 tot 0,90	+2,13 tot +1,83	kleilig zand	licht puin en koolas
	0,90 tot 1,30	+1,83 tot +1,43	siltig zand	licht puin
202	0,00 tot 0,60	+2,64 tot +2,04	siltig zand	puin
	0,60 tot 0,90	+2,04 tot +1,74	zand	puin en koolas
207	0,20 tot 0,50	+2,37 tot +2,07	-	koolas
	0,50 tot 0,90	+2,07 tot +1,57	kleilig zand	veel puin
208	0,40 tot 0,50	+1,90 tot +1,80	-	puin en koolas
	0,90 tot 2,30	+1,40 tot +0,00	siltig	zand licht puin
213	0,00 tot 0,50	+2,31 tot +1,81	zand	koolas/grind en puin

In tabel 4 is aangegeven welke monsters (alle ter plaatse van mini-slugtests) zijn ingezet voor korrelgrootte-analyses. Op basis van de analyseresultaten zijn bij de verschillende monsters de zandmedianen berekend, is de classificatie aangegeven en is volgens de formule van Bierkens de doorlatendheid berekend. Ter vergelijking met de berekende doorlatendheden uit de mini-slugtests zijn korrelgrootte-analyses uitgevoerd: aan de hand van deze verdelingen in korrelgrootten kan, door middel van verschillende methoden, een doorlatendheid van het bodemmateriaal worden geschat. De variatie in de doorlatendheden is in vergelijking met de mini-slugtests niet groot en de doorlatendheden zijn hoger dan op basis van de mini-slugtests.

Tabel 4. Analyseresultaten van de ingezette monsters.

boring	diepte (m-mv)	d_{50} (%)	classificatie NEN 5104 (mg/kgds)	CaCO ₃ (%)	org. stof (%)	k (m/d)
202	1,70 - 2,00	371	zwak siltig zeer grof zand	2,2	< 1,0	18,4
207	1,20 - 1,70	349	zwak siltig zeer grof zand	2,2	< 1,0	11,9
208	1,20 - 1,70	363	zwak siltig zeer grof zand	2,3	< 1,0	12,9
213	1,20 - 1,70	343	zwak siltig zeer grof zand	1,95	< 1,0	9,9
215	1,20 - 1,70	365	zwak siltig zeer grof zand	1,5	< 1,0	16,1

5.1.4 *Sonderingen*

De resultaten van de mini-slugtests tonen drie zones met verschillende k -waarden. Omdat de onderlinge verschillen in doorlatendheid niet door de verschillen in lithologie konden worden verklaard, is de volgende hypothese opgesteld: de verschillen in doorlatendheid worden toegeschreven aan een verschil in compactie als gevolg van verkeersbelasting. Aangenomen is dat gecompacteerd bodem een lagere doorlatendheid heeft en een hogere mechanische weerstand. Om dit te verifiëren is met behulp van sonderingen de penetratieweerstand bepaald.

De sondeergrafieken (zie bijlage D) geven geen significante verschillen te zien en een eenduidige relatie tussen de meetwaarden van de sonderingen en de mini-slugtests is niet uit de resultaten op te maken (zie tabel 4). De hypothese wordt derhalve verworpen.

5.1.5 *Sleuven*

Op de locatie zijn proefsleuven gegraven (zie de tekening in bijlage E). Het doel van deze sleuven of proefgaten is om ter plaatse een 'reëel' beeld (1 : 1) te krijgen van de bodemopbouw en de verontreiniging van de locatie. De plaats van de proefsleuven/gaten is gebaseerd op de resultaten uit voorgaande onderzoeken, met name de bodembeschrijving, de verontreinigingsgraad en de resultaten van de radarmetingen.

Ten gevolge van de hoge grondwaterstand op de locatie zijn de zijwanden van de proefsleuven vrijwel direct in elkaar gestort. De beschikbare tijd om de bodemopbouw te bestuderen was door het instorten van de wanden van de sleuf zeer beperkt. Tijdens het graafwerk was sprake van een gemiddelde grondwaterstand van circa 0,60 m-mv ter hoogte van de laag grof zand; dit had tot gevolg dat de wand bij het bereiken van die diepte vrijwel onmiddellijk instortte, zodat het niet mogelijk was om dieper te graven.

Foto's (zie bijlage F) en boorbeschrijvingen illustreren het algemene beeld: in de bodem is plaatselijk koolas en puin aangetroffen, echter zeer verspreid over het terrein en niet in aaneengesloten lagen of pakketten. Sintels zijn niet aangetroffen. Van de sleuf is een nauwkeurige profiel-schets getekend die is opgenomen als bijlage G.

5.1.6 Georadar

Metingen 1996

Op basis van de 26 radarprofielen van de 50 MHz metingen en de verwerking van deze zijn vier radarstratigrafische hoofdeenheden geclassificeerd. Van deze hoofdeenheden (A tot en met D) zijn B, C en D verder onderverdeeld. In totaal zijn negen (sub)eenheden onderscheiden. De radarstratigrafische (sub)eenheden en hun omschrijving zijn weergegeven in tabel 5.

Tabel 5. Radarstratigrafische eenheden voor gegevens verkregen met 50 MHz antennes.

code radarstratigrafische eenheid	kenmerken
A	hellende reflectie met hoge amplitude
B1	zone met onregelmatige reflectiepatronen, signaal tot circa 120 ns, <i>twee</i> duidelijke banden ten gevolge van interferentie van directe golven
B2	zone met onregelmatige reflectiepatronen, signaal tot circa 120 ns, <i>drie</i> duidelijke banden ten gevolge van interferentie van directe golven
C1	signaal met een zeer continu karakter 20 ns; weinig penetratie
C2	signaal met een zeer continu karakter 30 ns; weinig penetratie
C3	signaal met een zeer continu karakter, maar geen onderscheid te maken tussen het continue signaal op 20 ns en dat op 30 ns; weinig penetratie
C4	signaal valt in groep C maar met diffracties
D1	complex reflectiepatroon met hoge penetratie tot meer dan 100 ns
D2	complex reflectiepatroon met lage penetratie tot ongeveer 60 ns

De afbakening tussen de verschillende subeenheden is enigszins subjectief. Het onderscheid tussen de hoofdeenheden is echter zeer duidelijk. Alleen de eenheden A en C hebben een overlap met elkaar. In bijlage H en I is een grafische weergave van deze classificatie gegeven. Van het gehele terrein zijn bepaalde delen door de afwezigheid van goede metingen niet te classificeren onder één van de eenheden; deze gebieden zijn derhalve ook niet weergegeven in bijlage H.

De geringere golflengte van de metingen met 200 MHz leidt tot een geringere penetratiediepte, maar levert over het gebied tot circa 2,5 m-mv meer gedetailleerde informatie. Met de gegevens, verkregen met de 200 MHz antennes, zijn duidelijke reflectoren aan te geven die over een relatief grote afstand kunnen worden gevolgd. Ook kan de grondwaterspiegel in het gebied goed uit de verkregen profielen worden gedestilleerd. Ook op basis van deze data zijn, eveneens rekening houdend met verstoringen door objecten, zes radarstratigrafische (hoofd)eenheden aangegeven. Deze zijn weergegeven in tabel 6.

Tabel 6. Radarstratigrafische eenheden voor gegevens verkregen met 200 MHz antennes.

code radarstratigrafische eenheid	kenmerken
K1	geringe penetratie (tot circa 25 ns)
K2	geringe penetratie (tot circa 35 ns)
L	penetratie tot circa 55 ns en niet-continue dippende reflectiesignalen
M	witte band (10 ns) en zwarte band (15 ns)
N1	eerste sterke signaal op circa 50 ns en diepe penetratie
N2	tweede sterke signaal op circa 50 ns en diepe penetratie
O	zeer geringe penetratie (tot circa 20 ns)
P	grote penetratie en zwarte band op circa 50 ns

Naast de duidelijke reflectoren blijkt vooral de penetratiediepte een duidelijk onderscheidend criterium voor het definiëren van de radarstratigrafische eenheden.

Metingen 1998

Het georadarprofiel van 50 MHz kan worden onderverdeeld in drie secties: 30 - 42 m (complex reflectiepatroon met minstens 4 banden en een penetratie van 100 ns), 42 - 57 m (zone met 3 banden en een penetratie van ongeveer 70 ns) en 57 - 65 m (zone met 2 duidelijke banden en een penetratie van ongeveer 50 ns). De minder diepe penetratie tussen 45 m en 65 m duidt op een kleiiger ondergrond. De meting komt ruwweg overeen met de kaart met radarstratigrafische eenheden voor 50 MHz gegevens (zie fig. 3.2.1 in [1]). Volgens deze kaart is er halverwege het profiel (op ongeveer 45 m) een overgang van D2 (complex reflectiepatroon met penetratie tot ongeveer 60 ns) naar eenheid C2 (banden met een zeer continu karakter tot circa 30 ns). De diepe continue reflectieband op ongeveer 240 ns is het gevolg van de reflectie van radargolven door de lucht tegen de damwand, die parallel aan het profiel loopt.

Een voorbeeld van een radarprofielmeting (50 MHz) is opgenomen in bijlage J.

Het is niet goed mogelijk om, bij 50 MHz, het georadarprofiel te correleren met de sleufbeschrijving, omdat de directe golven door de lucht en de grond (de twee bovenste banden in het georadarprofiel) ongeveer dezelfde dikte als de sleuf hebben. De tweede band is in delen van het profiel niet goed zichtbaar. Dit is wellicht veroorzaakt door interferentie met het reflectiesignaal van de grondwaterspiegel.

De penetratiediepte van de meting met 200 MHz is ongeveer 80 ns. De diepere horizontale banden (35 - 80 ns) in het profiel zijn geïnterpreteerd als versterkte ruis. Op 35 m en 42 m zijn er vanaf een aankomsttijd van ongeveer 30 ns duidelijke diffractie-hyperbolen te zien. Dit is in overeenstemming met de waargenomen metalen objecten in de sleuf. Het 200 MHz profiel vertoont een grote laterale variatie; binnen het profiel kan onderscheid worden gemaakt tussen secties (30 - 36 m, 44 - 46 m en 53 - 59 m) met 4 ondiepe banden, secties (36 - 44 m en 46 - 53 m) met 3 ondiepe banden en een sectie met 2 ondiepe banden (59 - 65 m). Het omhoogkomen van de kleiige zandlaag in het begin van de sleuf (y: 30 - 38 m) is zichtbaar in het omhoogkomen van de derde en vierde reflectieband van het georadarprofiel [1].

Met een welwillend oog kan de gemeten grondwaterspiegel in het radarprofiel worden getekend. Echter, door interferenties met de bovenste twee banden (de directe golven) is de waterspiegel niet duidelijk zichtbaar als een continue band.

Een voorbeeld van een radarprofielmeting (200 MHz) is opgenomen in bijlage K.

5.1.7 Elektromagnetisme

Van de metingen uitgevoerd met de horizontale coplanaire spoelen is circa 95 % niet bruikbaar en is derhalve besloten om van verdere verwerking van de gehele dataset af te zien. De metingen verricht met de verticale coplanaire spoelen zijn wel bruikbaar. Na omwerking van de data is een grafische weergave gecreëerd. Deze is weergegeven in bijlage H.

De meer geleidende gebieden zijn geïdentificeerd in het noordoosten. De waarden tussen 5 Ω m en 20 Ω m geven aan dat het grondwater zeer brak tot zout is. De oost-west band is mogelijk bepaald door een kleiige bodem. Zeer lage weerstanden duiden op goed geleidende materialen in de bodem (metalen).

5.1.8 Tomografie

De resultaten van de tomografie op het Kieboom-terrein zijn teleurstellend. Het belangrijkste probleem is dat in de opgenomen gegevens geen eerste aankomst van voldoende amplitude zichtbaar is. Tijdens het veldwerk is op allerlei manieren geprobeerd toch een aankomst van betere kwaliteit van het uitgezonden signaal te registreren, maar dat is niet in voldoende mate gelukt. Voor de bepaling van het beeld van de ondergrond is de registratie van een zeer heldere eerste aankomst essentieel. Dit signaal dient voldoende boven de ruis uit te komen om een nauwkeurige aankomsttijd te bepalen. Door de lage signaal-ruisverhouding van dit signaal kan geen voldoende nauwkeurige aankomsttijd worden bepaald. Zonder nauwkeurige aankomsttijden is het niet mogelijk een beeld (tomogram) van de ondergrond te vervaardigen.

Op die opnamen, waarop wel enigszins een aankomst kan worden geïdentificeerd, valt op dat het signaal laat binnenkomt. Hoewel een belangrijk deel van de golf zich voortplant onder de grondwaterspiegel (verwachte snelheid in de orde van grootte van 1500 m/s), blijkt de gemiddelde snelheid in de buurt van 500 m/s te liggen. Een dermate lage snelheid onder de grondwaterspiegel duidt vaak op de aanwezigheid van gas. De aanwezigheid van gas gaat altijd gepaard met een grote demping, zoals ook uit de geringe amplitudes van het signaal is vastgesteld.

Het ontbreken van een eerste aankomst duidt op een sterke demping van de golven in de bodem. Tot dusver is tomografie gebruikt voor dieper gelegen sedimenten. Op basis van de resultaten van Kieboom moet worden geconcludeerd dat de bovenste paar meter op het Kieboom-terrein een sterk dempende werking hebben op de seismische golven. Recentelijk bij TNO beschikbaar gekomen analyses van andere seismische gegevens duiden ook op een hoge demping van de sedimenten van de bovenste paar meter op andere locaties.

5.1.9 Mini-slugtests

Op de locatie Kieboom zijn 28 mini-slugtests uitgevoerd. De waarden voor de doorlatendheden, alsmede ter vergelijking van de sondeergegevens, zijn in tabel 7 weergegeven.

Op basis van de resultaten zijn drie categorieën van doorlatendheden aan te geven:

1. zone met een goede doorlatendheid met k -waarden van 1 m/d en hoger;
2. zone met een geringe doorlatendheid met k -waarden kleiner dan 1 m/d;
3. zone waarbij geen water wordt verkregen en de doorlatendheid dus laag is ($k < 0,1$ m/d).

De k -waarden < 1 m/d en $< 0,1$ m/d moeten worden beschouwd als indicatieve waarden voor de verschillende snelheden waarmee het grondwater omhoog en neerwaarts gaat tijdens het uitvoeren van de mini-slugtests. Bij categorie 2 komt bij het aanbrengen van de onderdruk het grondwater met een geringe snelheid tot circa één meter boven het maaiveld, maar stroomt deze zeer langzaam tot niet merkbaar weg. Bij categorie 3 is na het aanbrengen van 95 % vacuüm voor een periode van meer dan vijf minuten nog geen additioneel water aangetoond in het filter. Dit duidt op een zeer lage doorlatendheid.

Er is geen verband gevonden tussen de resultaten van de mini-slugtests en de bepalingen met behulp van de korrelgrootteverdeling.

De ruimtelijke verspreiding van de gemeten k -waarden in het proefgebied zijn weergegeven in bijlage H.

Tabel 7. Bodemeigenschappen op basis van verschillende metingen.

meetpunt	diepte (m-mv)	mini-slugtest	korrelgrootte	sondering			
		k-waarde (m/d)	k-waarde (m/d)	conusweerstand (MPa)	schuifweerstand (MPa)	kleefgetal (%)	classificatie volgens sondering
200	1,2	?					
	1,7	?					
201	1,7	10					
202	1,7	3,5	18,4				
203/JJ266	1,2	6		2	0,01	0,5	zand
	1,4	7		1,5	0,005	0,3	zand
204	1,7	1,5					
205/JJ265	1,2	< 1		3,4	0,01	0,4	zand
	1,7	< 1		2,5	0,01	0,4	zand
206	1,2	< 1					
	1,7	< 1					
207	1,2	< 1	11,9				
	1,7	< 1					
208	1,2	< 0,1	12,9				
	1,7	< 0,1					
209	1,0	1,5					
	1,5	6					
210	1,2	< 0,1					
	1,7	< 0,1					
211/JJ264	1,2	< 0,1		2	0,005	0,4	zand
	1,7	< 0,1		0,6	0,015	2	klei
212	0,7	7					
	1,0	2,5					
213	1,2	< 0,1	9,9				
	1,7	< 0,1					
214	1,2	< 0,1					
	1,7	< 0,1					
215/JJ263	1,2	9,5	16,1	3,6	0,01	0,5	zand

5.1.10 Conclusies met betrekking tot de bodem van het Kieboom-terrein

Met betrekking tot de locatie Kieboom zijn de volgende deelconclusies getrokken:

- het geofysische onderzoek heeft duidelijk gemaakt dat de variabiliteit in de ondergrond wordt aangetoond door de combinatie van zowel de boorgegevens als de radargegevens;
- een redelijke overeenkomst tussen de penetratiediepte van radar/EM en de diepteligging van de top van de diepere kleilaag is aanwezig; er kan worden verondersteld dat in het gehele gebied C de kleilaag ondiep wordt aangetroffen;
- de grote variabiliteit (schaal enkele meters) in combinatie met een te beperkt begrip van de oorzaak van signalen bemoeilijkt de correlatie tussen boorgegevens en radarprofielen;
- in de bodem is plaatselijk koolas en puin aangetroffen, echter zeer verspreid over het terrein en niet in aaneengesloten lagen of pakketten; sintels zijn niet aangetroffen;
- in de uitwateringskil, waarvan op basis van een sanering op een aangrenzende locatie en op basis van historische gegevens werd verwacht dat deze met koolas was gedempt, is vrijwel geen koolas en puin aangetroffen; uit de boringen blijkt dat de kil is gedempt met zand;

- de concentraties verontreinigingen, met name minerale olie en PAK, zijn niet zodanig dat bij laboratoriummetingen van de beschikbaarheid een groot onderscheidend vermogen wordt verwacht.

5.2 Case Mijdrecht

5.2.1. *Locatiebeschrijving en hypothese*

De onderzoekslocatie Koek te Mijdrecht (zie bijlage M) heeft een oppervlakte van circa 1,5 ha en is deels bedekt met een betonnen verharding. Het terrein is in gebruik geweest voor de sloop van transformatoren en treinstellen, waarbij kabels en het interieur van treinen zijn verbrand. Tegenwoordig wordt het terrein gebruikt voor het slopen, sorteren, opslaan en verwerken (recyclen) van oud ijzer en kabels.

De bodem bestaat uit een opgebrachte (antropogene) zandlaag, gelegen op een kleilaag. Hieronder bevindt zich het eerste watervoerende pakket (pleistocene zandlaag). In de zandige toplaag bevinden zich in de grond verontreinigingen met minerale olie, PAK en zware metalen. In het grondwater (hetzelfde deel van het terrein) zijn hoge concentraties minerale olie aangetroffen.

5.2.2 *Bodemopbouw en zintuiglijke verontreinigen*

De toplaag van het bedrijfsterrein (maaveld ca. NAP -4 m) bestaat uit een zandlaag met een dikte van 0,6 tot 2,4 m (zie de foto met boorbeschrijving en het profiel in de bijlagen N en O). Hieronder bevindt zich een 5 meter dikke deklaag van klei, veen en slibhoudend zand waaronder zich het eerste watervoerend pakket bevindt. Het freatische niveau in de zandlaag op het terrein varieert rond NAP -4,65 m.

5.2.3 *Interpretatie: boringen*

Korrelgrootte-analyses

Van boringen in de toplaag is een aantal monsters geanalyseerd op korrelgrootteverdeling. De monsters zijn geselecteerd van plaatsen waarbij in de directe nabijheid mini-slugtests zijn uitgevoerd. De korrelgrootteverdelingen zijn weergegeven in tabel 8.

Schattingen van doorlatendheid

In tabel 8 zijn tevens de resultaten weergegeven van de mini-slugtests en de doorlatendheidsbepalingen aan de hand van de korrelgrootteverdelingen. Hieruit blijkt dat in sommige gevallen een verschil van meer dan een factor 10 optreedt (zowel onderschattingen als overschattingen). De oorzaak hiervan is vermoedelijk dat een aantal tests op het grensvlak van het ophoogzand en de klei is uitgevoerd en dat plaatselijke bijmengingen van kleiachtige deeltjes een grote rol in de korrelverdeling spelen (onderschatting) of dat de mini-slugtest meer in de klei is uitgevoerd dan in het veld is aangenomen (overschatting).

Met betrekking tot de locatie Koek zijn op basis van het verrichte onderzoek de volgende deelconclusies getrokken:

- de doorlatendheidsmetingen met behulp van de mini-slugtests zijn niet in overeenstemming met de verwachtingen op basis van de bodemopbouw;
- de doorlatendheidsmetingen met behulp van de mini-slugtests zijn niet in overeenstemming met de visuele waarnemingen van 'falling head' proeven in boorgaten en peilfilters op de locatie.

Tabel 8. Korrelgrootteverdeling conform NEN 5104.

meetpunt/monster	012/4	013/4	014/4	022/3	022/4	030/3	030/4	042/3	046/3	046/4	044/4
diepte monster (m-mv)	1,00 - 1,60	1,00 - 1,60	1,00 - 1,60	1,00 - 1,50	1,50 - 2,00	1,00 - 1,50	1,50 - 2,00	1,00 - 1,50	1,00 - 1,50	1,50 - 2,00	1,50 - 2,00
doorlatendheid k (min.sl.t) ¹ (m/dag)		0,055		3,98	0,43	2,93		1,72 0,7	4,4	0,93	
doorlatendheid k (formule) ² : schatting 1 (m/dag) schatting 2 (m/dag)	5,1 8,6	5,9 7,7	2,9 7,7	3,6 6,0	3,6 8,7	0,75 4,5		2,9 4,4	0,06 0,75	0,055	
grondsoort veld	ZS2H1	ZS3H1	ZS2H1	ZS2H1	ZS2H1	ZS2H1	KS2H1	ZS2H1	KS2H1	KZH1	KS2H1
grondsoort laboratorium	ZS1	ZS1	ZS1G1H1	ZS1	ZS1H1G1	ZKH1G1	KS3H2	ZS2H1G1	KZ3H1	KZ2H1G2	KS2H2
zandmediaan (μm)	193/matig fijn	201/matig fijn	204/matig fijn	200/matig fijn	220/matig grof	194/matig fijn		195/matig fijn	175/ matig fijn	161/matig fijn	
kleur	GR	GRBR	GR	GR	GR	GR	GR	GR	GR	GR	GR
droge stof (gew.%)	79,4	75,5	77,2	80,9	80,7	78,1	62,0	78,2	75,4	73,2	58,1
organisch stofgehalte (% van DS)	< 0,5	< 0,5	0,7	< 0,5	1,2	1,1	5,5	1,9	2,5	2,9	5,3
calciet	< 0,2	0,3	2,0	0,4	0,3	0,5	< 0,2	1,4	1,1	1,5	< 0,2
min.delen < 2 μm (lutum)	1,5	1,7	2,0	3,2	2,3	5,0	35	3,0	9,8	13	41
min.delen < 63 μm	5,8	3,4	5,6	9,5	5,7	13	85	9,3	26	35	95
min.delen < 2 mm	100	100	97	100	84	97	100	98	100	94	100
pH (KCl)	8,2	8,1	8,4	8,1	7,9	7,9	6,3	7,8	7,3	7,7	6,1

1 doorlatendheid volgens mini-slugtest [4].

2 doorlatendheid volgens formule van Bierkens [2]: geschatte waarde is afhankelijk van het gekozen snijpunt.

5.2.4 *Seismische tomografie*

De seismische tomografie op de locatie Koek te Mijdrecht is uitgevoerd door een sequentiële uitvoering van de metingen tussen verschillende paren buizen. De koppels bestaan altijd uit een buis met een bron en een buis met ontvangers. De ontvangers hebben een meetfrequentie van 1/64 ms voor een periode van 48 ms (3072 waarnemingen per meting).

De reproduceerbaarheid van het bronsignaal is goed, waardoor de bepaling van het dempings-tomogram betrouwbaar is. De opgenomen data bevatten veel achtergrondruis door het verkeer op de weg rondom de locatie en van de installaties (zeven en een zware centrifuge) op het terrein. De bewerkte data zijn omgezet in driedimensionale snelheidstomogrammen en tweedimensionale dempingstomogrammen. De grafische weergave van de driedimensionale snelheidstomogrammen is opgenomen in bijlage P (zie fig. P2, P3 en P4).

De tweedimensionale dempingstomogrammen zijn minder exact, doordat bij de bepaling alleen van de directe golven wordt uitgegaan. De tweedimensionale dempingstomogrammen zijn weer-gegeven in bijlage P (zie fig. P5 en P6).

Uit de a priori kennis omtrent de dempingseigenschappen van seismische golven door verschillende sedimentsoorten is een interpretatie gemaakt van de ondergrond vanaf de grondwater-spiegel (circa 1,35 m-mv tijdens de seismische metingen) tot de onderkant van de meetbuizen (circa 7,0 m-mv). De vertaling van de tomogrammen naar lithologiën is gebaseerd op de volgende observaties:

1. De kleien en venen hebben een zeer lage snelheid, namelijk kleiner dan 1100 m/s. Zulke lage waarden van klei komen in de literatuur niet voor.
2. De demping van de signalen door deze kleien zijn veel hoger dan die van gecompacteerd kleien.
3. In het driedimensionale snelheidstomogram is geen onderscheid te maken tussen kleien en venen.
4. Het zandpakket, dat op de klei ligt, is niet te onderscheiden van de kleien in de tomogrammen. Dit komt waarschijnlijk omdat het niet volledig verzadigd is, waardoor de snelheid zeer laag is.
5. De kleien hebben een hogere demping dan de venen.

Van de toplaag zijn geen betrouwbare signalen ontvangen, zodat de lithologie vanaf de kleilaag (deklaag) tot circa 7 m-mv wordt beschreven.

In bijlage P (zie fig. P7) is een semi-driedimensionale weergave van het snelheidstomogram van het gebied gegeven. Hierin zijn de verschillen in doorlatendheden (kwalitatief) aangegeven op basis van lithologische eenheden. Bovenaan is de onverzadigde zone weergegeven. De kleiïge verzadigde laag ligt op verschillende plaatsen op een venige laag die op haar beurt weer rust op een zandige laag. De zandlaag onderop het beschouwde gebied is in bijlage P (zie fig. P8) nader weergegeven. De fijnere en grovere zandgronden zijn in deze doorsnede goed zichtbaar. In bijlage Q zijn enkele foto's opgenomen van seismische tomografie.

5.2.5 *Mini-slugtests*

De mini-slugtests zijn gelijktijdig uitgevoerd met het conventionele veldwerk (zie de tekening in bijlage M). Op enkele plaatsen is de doorlatendheidsmeting niet succesvol door onbekende oorzaken, terwijl de korrelgrootteverdeling van het sediment een goede doorlatendheid doet vermoeden. Bij de veldmetingen met mini-slugtests en tests waarbij het piëzometrisch niveau abrupt sterk wordt verhoogd, is de neerwaartse snelheid zeer laag, hetgeen duidt op een zeer slechte doorlatendheid. Een hoog lutumgehalte kan hieraan ten grondslag hebben gelegen.

5.2.6 Bodemopbouw

De bodemopbouw op basis van de seismische tomografie en de mini-slugtests komt goed overeen met de waarnemingen van de boringen en geeft een duidelijk beeld van de doorlatendheid in het gebied: een 'badkuip' van klei opgevuld met fijn zand, liggend op een goed doorlatend watervoerend pakket.

5.2.7 Conclusies

Met betrekking tot de bodemopbouw van de locatie Koek zijn op basis van het verrichte onderzoek de volgende deelconclusies getrokken:

- in de zandige toplaag zijn sterk variërende lutum- en humusgehalten vastgesteld;
- de doorlatendheidsmetingen met behulp van de mini-slugtests zijn niet in overeenstemming met de verwachtingen op basis van de bodemopbouw;
- de doorlatendheidsmetingen met behulp van de mini-slugtests zijn niet in overeenstemming met de visuele waarnemingen van 'falling head' proeven in boorgaten en peilfilters op de locatie;
- de zandige toplaag, die schijnbaar homogeen van opbouw is, is voorzover het geofysische eigenschappen betreft in werkelijkheid heterogeen.

Met betrekking tot de seismische tomografie op de locatie Koek zijn op basis van het verrichte onderzoek de volgende deelconclusies getrokken:

- een relatie tussen de lithologie enerzijds en het snelheids- en dempingstomogram anderzijds is aangetoond;
- indien lagen volledig verzadigd zijn, kan onderscheid worden gemaakt tussen klei en zand. De zandlagen kunnen verder worden ingedeeld in 'fijn' of 'grof';
- indien lagen niet volledig verzadigd zijn, kan geen onderscheid worden gemaakt tussen zandlagen en kleilagen, omdat de voortplantingssnelheden zeer laag zijn;
- met behulp van snelheids- en dempingstomogrammen kan een driedimensionaal beeld van de ondergrond worden verkregen.

Met betrekking tot de mini-slugtests op de locatie Koek zijn op basis van het verrichte onderzoek de volgende deelconclusies getrokken:

- het totaal aantal uitgevoerde tests wordt beperkt door een geringe dikte van de verzadigde zone in de zandige toplaag;
- de aanwezigheid van fijn sediment in de grove fractie kan de bepaling van de absolute k -waarde beïnvloeden. Door 'purgings' (onttrekken van ca. 10 l) wordt de negatieve invloed van de fijne fractie op de testuitvoering beperkt;
- de reproduceerbaarheid van de tests, nadat 'purgings' is uitgevoerd, is hoog zoals blijkt uit de herhaalde proeven op dezelfde meetpunten.

HOOFDSTUK 6

EVALUATIE VAN DE TECHNIEKEN

6.1 Uitvoeringsaspecten

De onderlinge vergelijking van de verschillende technieken, die toegepast zijn op de locatie Kieboom te Rotterdam en de locatie Koek te Mijdrecht, is gebaseerd op de uitvoeringsaspecten en het vaststellen van de ruimtelijke variaties van de bodemheterogeniteit. De uitvoeringsaspecten bevatten logistiek, dieptebereik en resolutie.

De vergelijking van de uitvoeringsaspecten van de toegepaste technieken is samengevat in tabel 9 t/m 11.

Logistiek

Voor het verkrijgen van gegevens van goede kwaliteit is het noodzakelijk informatie over mogelijke storende objecten aan het oppervlak en in de ondergrond beschikbaar te hebben. Zo kan bijvoorbeeld voor georadar- en EM-metingen de aanwezigheid van kabels, leidingen en metalen hekken problematisch zijn voor het verkrijgen van goede gegevens. Omdat vele van de verontreinigde terreinen in of dichtbij de woonkernen gesitueerd zijn, kunnen toegepaste technieken overlast veroorzaken door bijvoorbeeld lawaai en aanvoer van materiaal.

Dieptebereik

Het dieptebereik van geofysische technieken is afhankelijk van de gekozen systeemconfiguratie en de omstandigheden in de ondergrond, zoals grondwaterdiepte en aanwezigheid van kleilagen nabij het oppervlak.

Resolutie

Het aantal metingen per oppervlak is afhankelijk van de systeemconfiguratie (b.v. de gebruikte spoelafstand) en het dieptetraject waarvoor de metingen zijn bedoeld.

Tabel 9. Logistiek.

techniek	storingen	overlast
georadar	metaal	geen
EM	metaal	geen
tomografie	gas in bodem	matig
mini-slugtest	beton	matig

Tabel 10. Dieptebereik (m) op Kieboom en Koek.

techniek	diepte	afhankelijk van
georadar	0 - 5/12	systeemkeuze en elektrische geleiding van de bodem
EM	0 - 10	systeemkeuze
tomografie	2/4 - 8	diepte boorgat
mini-slugtest	1 - 3	grondwaterdiepte en kleilagen

Tabel 11. Resolutie (m) op Kieboom en Koek.

techniek	verticaal	horizontaal
georadar (100 - 200 MHz)	0,5	0,5
EM (10 m spoelafstand)	geen	10
tomografie	1	1
mini-slugtest	0,5	geen

De belangrijkste aspecten bij de evaluatie van de ruimtelijke beschrijving van de bodemheterogeniteit betreffen de dikte en de continuïteit van de bodemlagen en de kwantificering van de hydraulische eigenschappen van deze lagen.

6.2 Ruimtelijke beschrijving van de bodemheterogeniteit

Voor de toegepaste geofysische technieken zijn de volgende conclusies getrokken:

1. Met georadar en met seismische tomografie is de discriminatie van eenheden met verschillende helling, dikte en continuïteit mogelijk.
2. Correlatie van de metingen met lithologie is mogelijk indien:
 - informatie uit boringen aanwezig is;
 - samenstelling van formatiewater bekend is (EM);
 - storende objecten aan het oppervlak en in de bodem bekend zijn (georadar).
3. Kwantificering van doorlatendheid van de uit geofysisch onderzoek geïnterpreteerde lithostratigrafische eenheden is alleen mogelijk met directe metingen, bijvoorbeeld met behulp van mini-slugtests.

6.3 Indicatie van de kosten

De kosten voor georadarmetingen (inclusief interpretatie), op een terrein met vergelijkbare grote en toegankelijkheid als het Kieboom-terrein, bedragen globaal f 10.000,-. De kosten voor EM-metingen (inclusief interpretatie), op hetzelfde terrein, bedragen circa f 5.000,-.

Uitvoering van de tomografie (inclusief interpretatie) kost globaal f 15.000,-. De prijs is exclusief kosten voor uitvoering van de nodige boorgaten.

Uitvoering van mini-slugtests (inclusief interpretatie), op 15 meetpunten in het horizontale vlak met 2 metingen per punt, bedraagt circa f 7.000,-.

TOEPASSING VAN DE ONDERZOEKSSTRATEGIE (OP LOCATIE KIEBOOM)

De karakterisatiemethodiek, zoals beschreven in hoofdstuk 2 (Onderzoeksstrategie), is gericht op het vaststellen van de horizontale en verticale verbreiding van goed en slecht doorlatende zones in de ondergrond en op het bepalen van de variabiliteit in doorlatendheid binnen de onderscheiden zones. Deze methodiek maakt deel uit van de strategie om te komen tot een saneringsvariant voor antropogene bodems. In figuur 7 is in kleur aangegeven welk deel van de strategie in het project is doorlopen.

Voor de hydraulische karakterisatie van de het Kieboom-terrein zijn de volgende stappen uitgevoerd:

Stap 1: Algemene beschrijving van de potentiële heterogeniteit op basis van een historisch onderzoek

Deze stap levert een globaal beeld op van de bodemsamenstelling en de activiteiten op het terrein.

Stap 2: Indeling van het terrein in verschillende zones op basis van een geofysische veldopname

De uitvoering van georadar- en EM-metingen resulteert in delineatie van verschillende zones, waarbinnen op basis van geofysisch respons een gelijke bodemopbouw wordt verondersteld. De mate van detail is afhankelijk van het gekozen meetgrid en de resolutie van de gebruikte technieken. Deze stap levert een kwalitatief beeld van de heterogeniteit.

Stap 3: Vertaling van de geofysische eenheden naar lithologische eenheden met behulp van nieuwe boorgegevens

De correlatie tussen geofysica en boorgegevens is afhankelijk van het aantal uitgevoerde boringen en de mate van detail van de boorbeschrijving in relatie tot de complexiteit van de ondergrond. Deze stap levert een globale indeling in permeabiliteitzones in termen: goed, slecht of niet doorlatend.

Stap 4: Kwantificering van de lithologische eenheden op basis van een gerichte doorlatendheidsbepaling

De doorlatendheid van de ondergrond is bepaald door middel van mini-slugtests. Deze zijn uitgevoerd in een grid, uitgezet op de veronderstelde overgangen van de lithologische eenheden. Deze stap levert zones met verschillende doorlatendheidsklassen op, die op basis van geïnterpreteerde k -waarden zijn ingedeeld.

Stap 5: Evaluatie van de heterogeniteit op basis van een synthese van verschillende technieken

De doorlatendheidsbepalingen ('harde' gegevens uit stap 4) worden ruimtelijk geëxtrapoleerd met behulp van de continue metingen ('zachte' gegevens uit de stappen 1, 2 en 3). Deze stap levert een overzichtskaart op van de doorlatendheidsklassen in het onderzochte gebied.

De vijf stappen, toegepast op de onderzoeksresultaten van het Kieboom-terrein, zijn schematisch weergegeven in figuur 8.

Fig. 7. Kader van het project: invulling met betrekking tot locatie Kieboom.

Fig. 8. Karakterisatiemethodiek voor het bepalen van de hydraulische heterogeniteit van de ondergrond met betrekking tot de locatie Kieboom.

Stap 1: Historisch onderzoek (zie fig. 8a)

Volgens het historisch onderzoek bestaat de bodem uit siltige en zandige ophooglagen, mogelijk vermengd met grove materialen. Dit antropogene materiaal bedekt het oorspronkelijke maaiveld, bestaand uit klei en veen. Op de locatie is een kil aanwezig, die vermoedelijk gedempt is met zand, koolas, slakken, puin en sintels.

Stap 2: Geofysisch onderzoek (zie fig. 8b)

Het geofysisch onderzoek resulteert in drie datasets, namelijk radar 50 MHz, radar 200 MHz en elektromagnetische gegevens. De 50 MHz radar levert de meest bruikbare informatie op. Op basis van het reflectiepatroon en de penetratiediepte is een aantal radarstratigrafische eenheden onderscheiden. In het zuidoostelijke gedeelte van het terrein is een complex reflectiepatroon met hoge en geringe penetratiediepte waargenomen (code D1 en D2). In het noordwestelijke deel is het signaal continu, maar is de penetratiediepte gering (code C). Een uitzondering in dit deel is een prominente scheefliggende structuur met hoge penetratiediepte (code A). Het grote aantal subeenheden wijst op het heterogene karakter van de bodem. Opvallend is dat er geen verschil is waargenomen tussen de opvulling van de kil en het omliggende terrein.

Stap 3: Boorprogramma (zie fig. 8c)

Met behulp van de gegevens uit de aanvullende boringen is een relatie gezocht tussen de geofysische interpretatie en de lithologie. Een relatie is gevonden tussen de gebieden met geringe penetratie van het radarsignaal en een ondiepe ligging van de klei. Op basis van de combinatie van de radarstratigrafische eenheden en de boringen kan het terrein worden ingedeeld in zones waar een kleilaag (waarschijnlijk) ondiep ligt en zones waar een kleilaag op grotere diepte ligt. De onderlinge verschillen in de samenstelling van de zandige lagen kunnen echter niet worden gekoppeld aan de radarstratigrafische eenheden.

Stap 4: Doorlatendheidsmetingen (zie fig. 8d)

De combinatie van geofysica met puntwaarnemingen resulteert in een globale indeling van het terrein op basis van de diepte tot de kleilaag. De grote variabiliteit in geofysische respons (zie fig. 8b) en te geringe aantal boringen maakt een meer gedetailleerde correlatie met de lithologie, en vervolgens met de doorlatendheid van het sediment, echter niet mogelijk. In een gebied met meerdere lithologische zones (noordwestelijk deel van het terrein) is daarom een fijn grid aangelegd waarin de mini-slugtests zijn uitgevoerd. De geïnterpreteerde doorlatendheden, gemeten op een gemiddelde diepte van 1,5 m beneden het maaiveld, zijn ingedeeld in drie klassen: $k < 0,1$ m/dag, $k = 0,1 - 1$ m/dag en $k > 1$ m/dag. De ruimtelijke verdeling van deze klassen resulteert in vier ruimtelijke permeabiliteitszones. Twee zones met een relatieve hoge permeabiliteit corresponderen met geofysische eenheden D1 en A. Deze zones zijn gescheiden door een zone met een zeer lage permeabiliteit (D2) en een zone met een lage permeabiliteit (C en het gebied met geen duidelijk radarsignaal).

Stap 5: Synthese (zie fig. 8e)

Op basis van de veronderstelde relatie tussen de radarstratigrafische eenheden en de doorlatendheden is voor het, door georadarmetingen bedekte, gebied een schematische verdeling van de permeabiliteit weergegeven. Het spreekt vanzelf dat vooral in het zuidoostelijke deel van het terrein, waar geen mini-slugtests zijn uitgevoerd, meer doorlatendheidsbepalingen nodig zullen zijn om de werkelijke heterogeniteit te bepalen. Niettemin heeft de toegepaste methodologie een duidelijke bijdrage geleverd aan het inzicht in de heterogeniteit van de ondergrond op het Kieboom-terrein.

HOOFDSTUK 8

CONCLUSIES

Met betrekking tot algemene onderzoeksstrategie:

1. De onderzoeksstrategie voor de karakterisatie van antropogene bodems ten behoeve van een in situ sanering bevat:
 - de specificatie van de gegevens die nodig zijn voor de beschrijving van het transport van de verontreinigingen in de ondergrond en het potentieel voor de natuurlijke afname van de concentraties in de bodem;
 - het opstellen van de methodologie om de gewenste gegevens te genereren.De onderzoeksstrategie, toegepast in dit project, is gericht op de beschrijving van de hydraulische heterogeniteit van de ondergrond.
2. In de algemene methodologie worden de volgende stappen onderscheiden:
 - inventarisatie van de beschikbare informatie;
 - hypothese van de bodemsamenstelling en de verontreiniging;
 - selectie van de technieken voor acquisitie van aanvullende gegevens;
 - data-acquisitie;
 - databewerking en integratie van de resultaten;
 - keuze en implementatie van de saneringstechniek.

Met betrekking tot conventioneel bodemonderzoek:

3. In antropogene bodems kunnen geen verontreinigingscontouren worden bepaald op grond van interpolatie van grondmonstergegevens.
4. In antropogene bodems moet een procesbenadering worden gehanteerd voor de interpretatie van de verontreinigingssituatie in plaats van een contourenbenadering.

Met betrekking tot innovatieve technieken (georadar, tomografie en mini-slugtest):

5. Het dieptebereik en de resolutie van de geofysische technieken is afhankelijk van de gekozen systeemconfiguratie en de omstandigheden in de bodem.
6. *Georadar en elektromagnetisme* leveren een tweedimensionaal beeld van de bodemheterogeniteit. Er is een redelijke overeenkomst tussen de penetratiediepte van radar/EM en de diepteligging van de top van de kleilaag. Beide methoden zijn gevoelig voor bovengrondse en ondergrondse storingen (metalen objecten).
7. *Seismische tomografie* levert een driedimensionaal beeld van de ondergrond. In volledig verzadigde lagen kan onderscheid worden gemaakt tussen klei en zand. Indien de bovenste meters van de ondergrond een sterk dempende werking hebben op de seismische golven (b.v. door aanwezigheid van gas) is het niet mogelijk een beeld van de ondergrond te verkrijgen.
8. *Mini-slugtests* leveren puntmetingen van de doorlatendheid. De metingen geven relatieve verschillen in de doorlatendheid aan die vaak niet in overeenstemming zijn met de verwachtingen op basis van de globale bodemopbouw. De aanwezigheid van fijne fractie in overwegend grof sediment kan de bepaling van de absolute k -waarde sterk beïnvloeden.

Met betrekking tot de toepassing van de onderzoeksstrategie op de cases (Kieboom en Mijdrecht):

9. Met georadar en met seismische tomografie is de discriminatie van eenheden met verschillende helling, dikte en continuïteit mogelijk.
10. Correlatie van de metingen met lithologie is mogelijk indien:
 - informatie uit boringen aanwezig is;
 - samenstelling van formatiewater bekend is (EM);
 - storende objecten aan het oppervlak en in de bodem bekend zijn (georadar).
11. Kwantificering van de doorlatendheid van de uit geofysisch onderzoek geïnterpreteerde lithostratigrafische eenheden is alleen mogelijk met directe metingen, bijvoorbeeld met behulp van mini-slugtests.
12. De toegepaste methodologie heeft een duidelijke bijdrage geleverd aan de toename van het inzicht in de heterogeniteit van de ondergrond voor saneringslocaties.

LITERATUUR

1. Geofysisch onderzoek Kieboom locatie Rotterdam.
NITG TNO, rapportnr. NITG - 97-62-B, Delft, augustus 1997.
2. Toepassing van mini-slugtests voor doorlatendheidsbepaling bij Nederlandse saneringslocaties.
NITG TNO, rapportnr. NITG - 97-49-B, Delft, 1997.
3. Seismische tomografie in Mijdrecht.
NITG TNO, rapportnr. NITG - 97-243, Heerlen, 1997.
4. Hydraulische karakterisatie: Mini-slugtest.
NITG TNO, rapportnr. NITG - 97-234-B, Delft, augustus 1997.
5. Aanvullend nader onderzoek en saneringsonderzoek Emplacementsweg fase K+ L.
Gemeentewerken Rotterdam Ingenieursbureau Milieu, Rotterdam, 1999.
6. Nader onderzoek naar de algemene kwaliteit van de grond en het ondiepe grondwater op de locatie Kop van Zuid, Emplacementsweg te Rotterdam.
Argus (Deelrapport A, grond en grondwaterkwaliteit), Delft, 14 juli 1992.
7. Nader onderzoek naar de bodemverontreiniging met olieproducten ter plaatse van het Kieboom-terrein (deelterrein 2) op de locatie Kop van Zuid, Emplacementsweg te Rotterdam.
Argus (Deelrapport C, Kieboom-terrein), Delft, 14 juli 1992.
8. Milieukundig saneringsverslag van de bodemverontreiniging op het NS-Emplacement aan de 2^e Rosestraat (fase C en D) te Rotterdam.
Gemeentewerken Rotterdam Ingenieursbureau Milieu, Rotterdam, 11 april 1997.

BIJLAGE A

LOCATIE KIEBOOM: SITUATIETEKENING

BIJLAGE B

LOCATIE KIEBOOM, BORING 128: FOTO EN BOORBESCHRIJVING

BIJLAGE C

LOCATIE KIEBOOM: BODEMPROFIEL

BIJLAGE D

LOCATIE KIEBOOM: SONDERINGEN

BIJLAGE E

**LOCATIE KIEBOOM: VELDWERK SLEUVEN, PROEFGATEN
EN FILTERS VOOR SEISMISCHE METINGEN**

BIJLAGE F

LOCATIE KIEBOOM: FOTO'S VAN SLEUVEN

BIJLAGE G

LOCATIE KIEBOOM: BODEMBESCHRIJVING VAN SLEUF A-G

BIJLAGE H

**LOCATIE KIEBOOM: RESULTATEN EM, GEORADAR 50 EN 200 MHz
EN MINI-SLUGTESTS**

BIJLAGE I

**LOCATIE KIEBOOM: COMBINATIE RESULTATEN GEORADAR 50 MHz
EN MINI-SLUGTESTS**

BIJLAGE J

LOCATIE KIEBOOM: RADARGRAMMEN 50 MHz

BIJLAGE K

LOCATIE KIEBOOM: RADARGRAMMEN 200 MHz

BIJLAGE L

LOCATIE KIEBOOM: FOTO'S VAN MINI-SLUGTESTS

BIJLAGE M

LOCATIE KOEK: SITUATIETEKENING

BIJLAGE N

LOCATIE KOEK, BORING 38: FOTO EN BOORBESCHRIJVING

BIJLAGE O

LOCATIE KOEK: BOORPROFIEL 3 VAN BORINGEN 21-38-22-45

BIJLAGE P

LOCATIE KOEK: TOMOGRAMMEN

Fig. P1. Locatie van de meetpunten (volgens bijlage M).

De metingen zijn achtereenvolgens tussen de volgende negen putparen uitgevoerd (tussen haakjes boringnummers van bijlage M):

- A: 4 - 1 (42 - 38)
- B: 4 - 2 (42 - 22)
- C: 4 - 5 (42 - 30)
- D: 4 - 7 (42 - 44)
- E: 5 - 7 (30 - 44)
- F: 5 - 1 (30 - 38)
- G: 5 - 2 (30 - 22)
- H: 5 - 3 (30 - 45)
- I: 5 - 6 (30 - 46)

Doorsneden van het driedimensionale snelheidstomogram

Van dit driedimensionale snelheidstomogram zijn verschillende doorsneden gemaakt. Hieronder volgt een opsomming van doorsneden met als plaatsbepaling een vergelijking in een orthogonaal coördinatenstelsel met als nulpunt boring 7 aan het maaiveld. De y-as loopt langs boring 7 en 4 richting oosten. De x-as staat loodrecht hierop richting zuiden (zie fig. P1).

Blad 1 (zie fig. P2)

doorsnede 1: $y = 0$
doorsnede 2: $y = 2,00$
doorsnede 3: $y = 4,00$
doorsnede 4: $y = 6,01$
doorsnede 5: $y = 8,01$
doorsnede 6: $y = 10,02$
doorsnede 7: $y = 12,02$
doorsnede 8: $y = 14,02$

Blad 2 (zie fig. P3)

doorsnede 1: $x = 18,97$
doorsnede 2: $x = 16,86$
doorsnede 3: $x = 14,75$
doorsnede 4: $x = 12,64$
doorsnede 5: $x = 10,54$
doorsnede 6: $x = 8,43$
doorsnede 7: $x = 6,3$
doorsnede 8: $x = 4,2$

Blad 3 (zie fig. P4)

doorsnede 1: $z = -7,11$
doorsnede 2: $z = -6,22$
doorsnede 3: $z = -5,33$
doorsnede 4: $z = -4,44$
doorsnede 5: $z = -3,55$
doorsnede 6: $z = -2,66$

Verklaring van de gebruikte kleuren in figuur P2, P3 en P4.

Fig. P2. Doorsneden van het driedimensionale snelheidstomogram (y-as).

Fig. P3. Doorsneden van het driedimensionale snelheidstomogram (x-as).

Fig. P4. Doorsneden van het driedimensionale snelheidstomogram (z-as).

Fig. P5. Driedimensionaal snelheidstomogram met geïnterpreteerde opbouw van de ondergrond (zwarte kleur = onverzadigde zone; blauwe en paarse kleur = klei en veen; groene kleur = fijne zanden; gele tot rode kleur = matig tot grove zanden),

Tweedimensionale dempingstomogrammen

De volgorde van de tomogrammen is als volgt (zie fig. P1):

Blad 1 (zie fig. P6)

tomogram 1: van boring 1 tot boring 4

tomogram 2: van boring 2 tot boring 4

tomogram 3: van boring 5 tot boring 4

tomogram 4: van boring 7 tot boring 4

tomogram 5: van boring 7 tot boring 5

tomogram 6: van boring 1 tot boring 5

Blad 2 (zie fig. P7)

tomogram 7: van boring 2 tot boring 5

tomogram 8: van boring 3 tot boring 5

tomogram 9: van boring 6 tot boring 5

Verklaring van de gebruikte kleuren in figuur P6 en P7.

Fig. P6. Tweedimensionale dempingstomogrammen.

Fig. P7. Tweedimensionale dempingstomogrammen.

Fig. P8. Driedimensionaal snelheidstomogram met geïnterpreteerde zandige crevasse afzettingen (groene kleur = fijne zanden; gele tot rode kleur = matig tot grove zanden; de kleien en venen zijn weggelaten).

BIJLAGE Q

LOCATIE KOEK: FOTO'S VAN SEISMISCHE TOMOGRAFIE