

NOBIS 95-2-02
VERBETERING VAN DE POSITIE VAN DE IN
SITU BIODEGRADATIEVARIANT DOOR TOE-
VOEGING VAN IMBITIE EN DRAINAGE AAN
BESTAANDE THEORIE

Fase 2: Zonering

ir. K.R. Weytingh (The Three Engineers i.o.v. Ingenieursbureau 'Oranjewoud' B.V.)

ir. P.O. de Vries (The Three Engineers i.o.v. Ingenieursbureau 'Oranjewoud' B.V.)

juli 2000

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, "©"Verbetering van de positie van de in situ biodegradatievariant door toevoeging van imbibitie en drainage aan bestaande theorie - Fase 2: Zoning", juli 2000, 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, "©"Improvement of the position of in situ bioremediation by adding the concept of imbibition and drainage to existing theory - Phase 2: Zoning", July 2000, 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

Verbetering van de positie van de in situ biodegradatievariant door toevoeging van imbibitie en drainage aan bestaande theorie
Fase 2: Zonering

CUR/NOBIS rapportnummer

95-2-02

Project rapportnummer

95-2-02 fase 2

Auteur(s)

ir. K.R. Weytingh
ir. P.O. de Vries

Aantal bladzijden

Rapport: 50
Bijlagen: 27

Uitvoerende organisatie(s) (Consortium)

Ingenieursbureau 'Oranjewoud' B.V. (ir. E. van den Akker, 0570-679431)
Universiteit Twente (dr.ir. H.J.H. Brouwers, 053-4894056)
Technische Universiteit Delft (ir. B. Putters, 015-2784845)
Provincie Friesland (ing. D. Holwerda, 058-2925143)
Provincie Gelderland (ing. J.F. Krom, 026-3599921)
Shell Global Solutions (dr. W.W. Veerkamp, 070-3772298)

Uitgever

CUR/NOBIS, Gouda

Samenvatting

De toepasbaarheid van een saneringstechniek hangt af van de aard van de verontreiniging, van de opbouw van de bodem en van de fysische, chemische of biologische omstandigheden die in de bodem aanwezig zijn. Bij zonering worden deze aspecten afzonderlijk in beeld gebracht, waarna de beoordeling van de toepasbaarheid plaatsvindt door de afzonderlijke beelden over elkaar te schuiven. Het onderzoek is met name gericht op de technieken ter onderscheid van de retentiezone en de retardatiezone (olie-op-watertest, geurmetingen, fieldkit en FFD-conus) en ter onderscheid van de aërobe zone en de anaërobe zone (zuurstofsonde en redoxsonde). Hierbij is vooral gefocust op nauwkeurigheid en reproduceerbaarheid. Daarnaast is de methodiek trajectdifferentiatie ontwikkeld, waarmee de bodem op een tamelijk gedetailleerd schaalniveau objectief kan worden gekarakteriseerd. Trajectdifferentiatie is gebaseerd op een statistische bewerking van sondeergegevens.

Trefwoorden**Gecontroleerde termen:**

bodemprofiel, organoleptische bepaling, statistiek, zonering, zuurstof

Vrije trefwoorden:

bodemonderzoek, heterogeniteit, karakteriseren, redoxpotentiaal, sondering

Titel project

Verbetering van de positie van de in situ biodegradatievariant door toevoeging van imbibitie en drainage aan bestaande theorie

Projectleiding

Ingenieursbureau 'Oranjewoud' B.V.
(ir. E. van den Akker, 0570-679431)

Dit rapport is verkrijgbaar bij:

CUR/NOBIS, Postbus 420, 2800 AK Gouda

Report title

Improvement of the position of in situ bioremediation by adding the concept of imbibition and drainage to existing theory
Phase 2: Zoning

CUR/NOBIS report number

95-2-02

Project report number

95-2-02 phase 2

Author(s)

ir. K.R. Weytingh
ir. P.O. de Vries

Number of pages

Report: 50
Appendices: 27

Executive organisation(s) (Consortium)

Ingenieursbureau 'Oranjewoud' B.V. (ir. E. van den Akker, +31-570-679431)
Universiteit Twente (dr.ir. H.J.H. Brouwers, +31-53-4894056)
Technische Universiteit Delft (ir. B. Putters, +31-15-2784845)
Provincie Friesland (ing. D. Holwerda, +31-58-2925143)
Provincie Gelderland (ing. J.F. Krom, +31-26-3599921)
Shell Global Solutions (dr. W.W. Veerkamp, +31-70-3772298)

Publisher

CUR/NOBIS, Gouda

Abstract

The applicability of a remediation technique depends on the kind of pollution, soil structure and physical, chemical and biological conditions of the soil. Within zoning, these aspects are dealt with one by one resulting in some kind of a map. Judging of applicability then is done by overlaying the maps. The investigation has been focused on techniques to discriminate retention and retardation zones (oil on water test, odour observations, fieldkit and fluorescence) and aerobic and anaerobic zones (oxygen and redox probe). Special attention has been given to reproducibility and precision. Besides the technique of trajectory differentiation is developed. Trajectory differentiation characterizes the soil on a quite detailed level in a way which is however still reproducible and controllable. The method is based on a statistical evaluation of probe data.

Keywords**Controlled terms:**

oxygen, sense perception, soil structure, statistics, zoning

Uncontrolled terms:

characterizing, heterogeneity, probe, redox potential, soil investigation

Project title

Improvement of the position of in situ bioremediation by adding the concept of imbibition and drainage to existing theory

Project management

Ingenieursbureau 'Oranjewoud' B.V.
(ir. E. van den Akker, +31-570-679431)

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

VOORWOORD

In opdracht van NOBIS is in 1995 begonnen met het project dat de bijnaam I & D kreeg. De basisgedachte van het project is het toevoegen van gangbare kennis uit andere vakdisciplines aan de kennis van saneringsdeskundigen omtrent bodemprocessen. In het onderhavige geval vooral de kennis vanuit de mijnbouw en chemie. Aan het project is gedurende de onderzoeksperiode door velen uit de organisaties van de consortiumleden meegewerkt. Penvoerder 'Oranjewoud' heeft het project getrokken in samenwerking met de provincies Gelderland en Friesland. Shell Research heeft consortiumlid Shell Verkoopmaatschappij ondersteund met laboratoriumproeven. De universiteiten Twente en Delft hebben het project kwalitatief ondersteund. In de laatste fase hebben The Three Engineers in opdracht van de penvoerder het project over de eindstreep getrokken.

Wat ons betreft heeft het onderzoek waardevolle resultaten opgeleverd. Zonering, een methodiek om de verontreinigingssituatie te karakteriseren vanuit saneringsperspectief, is gebruikt in het Handboek Bodemsaneringstechnieken. De bodemmarkt begint de waarde van de oliekaracterisatie te herkennen. Dit product moet nu zijn commerciële plaats bewijzen. Voor het gebruik van perslucht zijn zeer praktische ontwerp- en dimensioneringshandvatten ontwikkeld die met deze eindrapportages op de markt verschijnen. In het kader van zonering en perslucht is een objectieve karakterisatiesystematiek ontwikkeld, trajectdifferentiatie; een methodiek om de heterogene bodem te lijf te gaan gebaseerd op sondeergegevens. Wij verwachten dat boorbedrijven dankbaar gebruik zullen maken van de methodiek.

De resultaten van het onderzoeksproject zijn gerapporteerd in 6 rapportages: Eindrapportage fase 1 (september 1997), Grondradar (september 1998), Oliekaracterisatie (juli 1998), Zonering (juli 2000), Perslucht (juli 2000) en een evaluerend Eindrapport (juli 2000). Voor u ligt het rapport "Zonering".

The Three Engineers
juli 2000

INHOUD

		SAMENVATTING	vi
		SUMMARY	ix
Hoofdstuk	1	WAT IS ZONERING?	1
Hoofdstuk	2	ZONERING BIJ OLIEVERONTREINIGINGEN	3
	2.1	Relatie met imbibitie en drainage	3
	2.2	Zoneringskarakteristieken	3
Hoofdstuk	3	DENKKADER	5
	3.1	Imbibitie en drainage bij verontreinigingen met olie	5
	3.2	Heterogeniteit	7
	3.3	Nauwkeurigheid, reproduceerbaarheid en precisie	8
Hoofdstuk	4	RETENTIE- EN RETARDATIEZONE	11
	4.1	Olie-op-watertest	11
	4.2	Geurwaarnemingen	12
	4.3	Fieldkit	15
	4.4	Fluorescentie	17
Hoofdstuk	5	AËROBE EN ANAËROBE ZONE	21
	5.1	Zuurstofsonde	21
	5.2	Redoxsonde	22
Hoofdstuk	6	NAUWKEURIGHEID	25
Hoofdstuk	7	BODEMKARAKTERISERING VANUIT PERSLUCHTPERSPECTIEF	27
	7.1	Intreedruk en doorlatendheid	27
	7.2	Relaties met de grondsoort	28
	7.3	Trajectdifferentiatie	30
Hoofdstuk	8	TRAJECTDIFFERENTIATIE	33
	8.1	Algemene karakteristiek	33
	8.2	Verticale indeling	34
	8.2.1	Statistische keuzes	34
	8.2.2	Bodemkundige keuzes	37
	8.2.3	Proceskundige keuzes	40
	8.2.4	Trajectkarakterisering	40
	8.3	Horizontale indeling	41
	8.4	Bodemkarakterisatie	43
Hoofdstuk	9	CONCLUSIES	47
		LITERATUUR	49
Bijlage	A	ZINTUIGLIJKE WAARNEMINGEN EN ANALYSERESULTATEN	

Bijlage	B	ZUURSTOFMETINGEN
Bijlage	C	REDOXMETINGEN
Bijlage	D	PROTOCOL VOOR OLIE-OP-WATERTEST ZONERING
Bijlage	E	ANALYSEGEGEVENS VAN GRONDMONSTERS VOOR HET AFLEIDEN VAN DE DOORLATENDHEID EN DE INTREEDRUK VAN BODEMLAGEN

SAMENVATTING

Verbetering van de positie van de in situ biodegradatievariant door toevoeging van imbibitie en drainage aan bestaande theorie - Zonering

De toepasbaarheid van een saneringstechniek hangt af van de aard van de verontreiniging, van de opbouw van de bodem en van de fysische, chemische of biologische omstandigheden die in de bodem aanwezig zijn. Bij zonering worden deze aspecten afzonderlijk in beeld gebracht, waarna de beoordeling van de toepasbaarheid plaatsvindt door de afzonderlijke beelden over elkaar te schuiven.

De toepassing van persluchtinjectie bij olieverontreinigingen is gebaseerd op een drietal potentieel optredende processen, het verdringen van olie door lucht, het strippen van de olie of van het daarmee verontreinigde grondwater en het stimuleren van de aërobe afbraak door het verhogen van de zuurstofconcentratie. Voor het beoordelen van de mate waarin van deze processen bij de sanering van een olieverontreiniging gebruik kan worden gemaakt, is met name het onderscheid tussen de retentiezone en de retardatiezone en tussen de aërobe zone en de anaërobe zone van belang. Daarnaast moet de bodem op een tamelijk gedetailleerd schaalniveau kunnen worden gekarakteriseerd naar de intreedruk en de doorlatendheid voor lucht.

Methoden om de grens tussen de retentiezone en de retardatiezone en tussen de aërobe zone en de anaërobe zone in kaart te brengen zijn ontwikkeld en getest op vier locaties. Het betrof twee locaties met een benzineverontreiniging (Hoofdweg Damwoude en Vreelandseweg Hilversum) en twee locaties met een diesel(achtige) verontreiniging (Gerwenseweg Helmond en Heereweg Midslant). De beschouwde methoden zijn gebaseerd op de olie-op-watertest en op geurwaarnemingen voor de grens tussen de retentiezone en de retardatiezone en op de zuurstofsonde voor de grens tussen de aërobe en de anaërobe zone. Ter ondersteuning van de olie-op-watertest en de geurwaarnemingen zijn fieldkitmetingen en chemische analyses op minerale olie en aromaten (BTEX) verricht. Ter ondersteuning van de zuurstofmetingen zijn metingen verricht met een redoxsonde. Tijdens het onderzoek zijn met name de beperkingen duidelijk geworden van de onderzochte methoden ten aanzien van het detail dat nodig is voor een goede beoordeling van in situ methoden. Aanvullend zijn daarom op een vijfde locatie (Zutphensestraat Brummen) sonderingen verricht, waarbij ook de bruikbaarheid is geëvalueerd van de fluorescentiesonde om de grens tussen de retentiezone en de retardatiezone in beeld te brengen. Aan de hand van de sondeergegevens is trajectdifferentiatie ontwikkeld om de sondeergegevens met behoud van het gewenste hoge detailniveau reproduceerbaar en controleerbaar te kunnen verwerken.

De reproduceerbaarheid is steeds bepaald door twee meetploegen op twee verschillende dagen volgens eenzelfde monsternemingsstrategie de betreffende metingen te laten uitvoeren. Uit de resultaten is per meetploeg een schatting gegeven van zowel de omvang van de zone als de ligging ervan. De reproduceerbaarheid, waarmee de ligging van de zones is vastgesteld, is daarbij steeds kleiner dan de reproduceerbaarheid waarmee de omvang is vastgesteld. Dit is logisch, omdat voor de ligging slechts het deel van het bodemvolume meetelt dat door beide meetploegen als de betreffende zone is gekwalificeerd.

De reproduceerbaarheid van de omvang van de zones bedraagt in het algemeen meer dan 80 % en is dus goed. Alleen bij zeer kleine zones kan de reproduceerbaarheid kleiner zijn. Ten aanzien van de ligging is de reproduceerbaarheid van de retentiezone doorgaans kleiner dan

van de aërobe zone, met name indien daarbij gebruik wordt gemaakt van geurwaarnemingen. Voor de retentiezone ligt de reproduceerbaarheid van de ligging tussen circa 40 en 70 %. Voor de aërobe zone ligt deze tussen circa 70 en 90 %.

De precisie van de methoden is voor de grens tussen de retentiezone en de retardatiezone onderzocht door de metingen onderling te vergelijken alsmede met de resultaten van chemische analyse. Voor de olie-op-watertest is er sprake van een logische relatie, waarbij de grens tussen positieve en negatieve olie-op-waterreacties ligt in het traject tussen 100 en 300 mg/kg aan minerale olie. Dit impliceert dat olie een sterke voorkeur heeft om in de bodem als afzonderlijke oliefase achter te blijven en wellicht vaker in de vorm van olielichaampjes aanwezig is dan waarvan in gangbare denkmodellen wordt uitgegaan. Dit onderstreept het belang van kennis over het fasegedrag - en van imbibitie en drainage - van olie en lucht bij het opstellen en evalueren van in situ saneringsvarianten.

Matige en sterke benzine(achtige) geuren gaan gepaard met positieve olie-op-waterreacties en duiden op een retentiezone. Een diesel(achtige) geur gaat altijd gepaard met een positieve olie-op-waterreactie. Hiervoor geldt echter dat de afwezigheid van een geur niet betekent dat de olie-op-waterreactie dan ook negatief is. Op basis van geurwaarnemingen kan dus slechts worden aangegeven waar olie ten minste als oliefase aanwezig is. Vergelijking van de geurwaarnemingen voor de benzine(achtige) verontreiniging met de resultaten van chemische analyse geeft aan dat sterkere geuren weliswaar gepaard gaan met hogere gehalten, maar dat de overlap zodanig groot is dat uit afzonderlijke geurwaarnemingen geen zinvolle schattingen van het gehalte kunnen worden gegeven. Het gebruik van geurwaarnemingen wordt overigens vanuit arbeidshygiënische redenen ontraden.

Omdat het gebruik van zowel de olie-op-watertest als geurwaarnemingen ondersteuning van chemische analyse behoeft, is onderzocht in hoeverre de relatief kostbare en tijdvergende laboratoriumanalyse kan worden vervangen door een zogenaamde fieldkitmeting in het veld. De correlatie tussen de fieldkitmetingen en de resultaten van chemische analyse is hiervoor echter onvoldoende.

De precisie van de zuurstofmetingen is niet vastgesteld, omdat geen alternatieve meetmethoden zijn toegepast. Wel is de relatie onderzocht met de redoxpotentiaal. De redoxpotentiaal is gevoelig voor wijzigingen in milieuchemische omstandigheden bij zuurstofconcentraties die lager zijn dan 2 mg/l. Hieruit is geconcludeerd dat bij hogere concentraties zuurstof blijkbaar de milieuchemische condities domineren en het milieu als aëroob kan worden gedefinieerd. De grens tussen de aërobe en de anaërobe zone is derhalve bij een zuurstofconcentratie van 2 mg/l gelegd.

Metingen met de fluorescentiesonde zijn als onderdeel van een sondeerprogramma gemakkelijk uit te voeren. De reproduceerbaarheid lijkt redelijk maar is moeilijk te kwantificeren doordat sonderingen zeer moeilijk vlak naast elkaar uit te voeren zijn en, indien dit lukt, niet uit te sluiten is dat de tweede meting door de eerste meting wordt beïnvloed. Door de relatief grote afstand tussen de sonderingen lijken de verschillen tussen de duplometingen dan ook vooral te worden bepaald door ruimtelijke heterogeniteit.

Naast de gemakkelijke uitvoerbaarheid en de redelijk lijkende reproduceerbaarheid heeft de fluorescentiemeting als onderdeel van een sondering het voordeel van een gedetailleerde meet-schaal die goed aansluit bij de schaal waarop olie in de bodem aanwezig is, alsmede van de continuïteit van de waarnemingenreeks naar de diepte. Dit laatste is tevens het voordeel van het gebruik van de 'normale' sondeergegevens - conusweerstand en wrijvingsgetal - om de bodempopbouw in beeld te brengen op een schaalniveau dat relevant is ten aanzien van het gedrag van

perslucht. De bruikbaarheid van sondeergegevens voor zowel het in kaart brengen van de retentiezone als van de bodemopbouw heeft geleid tot het ontwikkelen van trajectdifferentiatie. Trajectdifferentiatie is een statistische methode om de bodemopbouw op basis van sondeergegevens op een reproduceerbare en controleerbare manier in beeld te brengen. De methode berust op het indelen van een (verticale) gegevensreeks in relatief homogene segmenten of trajecten. Voorzover de opeenvolging van trajecten voorspelbaar is, vormen de trajecten bodemlagen. De trajecten binnen een laag vertegenwoordigen clusters van qua aard meer overeenkomstige bodemgedeelten. In tegenstelling tot die van de lagen is de ligging van deze clusters echter niet voorspelbaar. De clusters worden dan ook geacht random binnen de laag voor te komen. Combinaties van conusweerstand en wrijvingsgetal geven informatie over de grondsoort. Grondsoort geeft informatie over de intreedruk en de doorlatendheid van een bodemlaag voor lucht. Beide relaties zijn niet eenduidig en het interpreteren van intreedruk en doorlatendheid uit conusweerstand en wrijvingsgetal is derhalve omgeven met onzekerheid. Desalniettemin is het een van de weinige, zo niet de enige, gemakkelijk uitvoerbare en betaalbare methode om onder de randvoorwaarden van gangbaar saneringsonderzoek een voldoende gedetailleerd beeld van de bodem te verkrijgen.

De verticale indeling van de sondeergegevens is gebaseerd op een 'split-moving window' methode waarbij lokaal naar statistisch significante overgangen wordt gezocht. De mate van 'lokaal' zijn kan worden ingesteld, is derhalve arbitrair maar tevens controleerbaar. Met betrekking tot de beoordeling van een bodemopbouw ten aanzien van het gedrag van olie of perslucht is 'lokaal' gedefinieerd als een diepte-interval tot ten hoogste 16 cm.

De grootte van de lokale overgang wordt gekwantificeerd in een 'generalized difference'. Om de statistische significantie van de generalized difference vast te stellen moeten de waarden, waarop de generalized difference is gebaseerd, vooraf logaritmisch worden getransformeerd om voldoende aansluiting te verkrijgen bij de normale verdeling die aan het toetsen met de gebruikte Student's t-toets noodzakelijk is. Tenslotte speelt bij de verticale trajectindeling dat de split-moving window methode slechts kan worden toegepast op een reeks tegelijkertijd. De basisgegevens bestaan echter uit twee gegevensreeksen, conusweerstand en wrijvingsgetal. In de ontwikkelde procedure worden deze reeksen via 'principal component analyse' tot een reeks gecombineerd. De principal component analyse waarborgt daarbij dat deze combinatie met een zo gering mogelijk verlies aan informatie gepaard gaat.

De onderscheiden trajecten worden per laag via de gemiddelde conusweerstand en het gemiddelde wrijvingsgetal gekoppeld aan een grondsoortindeling. De interpretatie van de grondsoort naar de relevante eigenschappen - voor persluchtinjectie naar intreedruk en doorlatendheid - geeft de mogelijkheid om de trajecten in te delen naar relevante afwijkingen van het 'algemene' gedrag in de laag. Trajecten waarvoor dit het geval is, gelden dan als heterogeniteit. Per laag kan de heterogeniteitsdichtheid worden bepaald alsmede de minimale en de maximale afmetingen van de heterogeniteiten.

De wijze waarop trajectdifferentiatie in het ontwerpen en dimensioneren van een saneringsvariant voor een olieverontreiniging met perslucht kan worden ingepast, is verder uitgewerkt in het deelrapport inzake de cluster "Perslucht".

Voor het zoneren van olieverontreiniging ten behoeve van persluchtinjectie wordt aanbevolen de benodigde verontreinigings- en bodemkarakteristieken zoveel als mogelijk te verzamelen via sondeertechnieken en de resultaten via trajectdifferentiatie te verwerken. De sondeermethoden hebben als voordeel dat zij breed toepasbaar en betaalbaar zijn. De trajectdifferentiatie staat borg voor een grote mate van detail, waarbij de methode en de uitkomst toch reproduceerbaar en controleerbaar is.

SUMMARY

Improvement of the position of in situ bioremediation by adding the concept of imbibition and drainage to existing theory - Zoning

The applicability of a remediation technique depends on the kind of pollution, soil structure and physical, chemical and biological conditions of the soil. Within zoning, these aspects are dealt with one by one resulting in some kind of a map. Judging of applicability takes place by overlaying the maps.

The applicability of air sparging on oil pollution is based on three processes that might take place: displacement of pure oil by water, stripping of oil or polluted groundwater and stimulation of aerobic biodegradation by raising the concentration of oxygen. Knowing the location of retention and retardation zones, aerobic and anaerobic zones then is crucial to estimate the extension in which these processes can be used during the remediation. Also the soil has to be characterized with respect to entry pressure and air permeability on a quite detailed level.

Methods to map the boundary between the retention and retardation zone and between the aerobic and anaerobic zone are developed and tested at four sites. Two sites were polluted with gasoline (Hoofdweg Damwoude and Vreelandseweg Hilversum) and two sites with diesel (Gerwenseweg Helmond and Heereweg Midsland). The considered methods are based on the 'oil on water' test and odour observations concerning the retention-retardation boundary, and based on the oxygen probe concerning the aerobic-anaerobic boundary. Chemical analyses on mineral oil ($C_6 - C_{40}$) and aromatics (BTEX) and fieldkit measurements are used to support the 'oil on water' test and odour observations. To support oxygen measurements the redox probe is used. The investigation particularly showed the lack of detail needed to judge the concerned in situ methods. Therefore supplementary probes have been taken (Zutphensestraat Brummen). During these probes, the use of the fluorescence-probe to map the retention-retardation boundary has been evaluated. Based on these data, 'trajectdifferentiation' has been developed. This method makes it possible to digest probe data reproducibly and controllably without losing the desired level of detail.

Reproducibility has been defined by comparing the results of two teams following the same strategy of sample taking. Measurements were done on two different days. Location and extension of the zone are estimated using the results of each team. Estimation of location is less reproducible than estimation of the extension of the zones. This is predictable because estimating the location only that part of the soil volume is taken into account which has been qualified as the considered zone by both teams.

The reproducibility of the extension of the zones usually exceeds 80 %, which means a good reproducibility. For small zones the reproducibility can be less. Considering location of the zone, the retention zone usually is less reproducible than the aerobic zone, especially when odour observations are used. With respect to location of the zone, reproducibility of the retention zone is between 40 and 70 % and of the aerobic zone between 70 and 90 %.

Precision of the methods considering the retention-retardation boundary has been analysed by comparing the measurements and the results of chemical analysis. A logical relationship for the 'oil on water' test has been found. The boundary between positive and negative 'oil on water' reactions is between 100 to 300 mg/kg of mineral oil. It implies that oil has a strong preference to stay in the soil as a separate oil phase and probably more often appears as oil droplets than is

kept in mind in conventional thinking. This underlines the importance of knowledge of phase behaviour - in particular imbibition and drainage - of oil and air in composing and evaluating in situ remediation variants.

Moderate and strong gasoline odour is attended with a positive 'oil on water' reaction and suggest a retention zone. Diesel odour is always attended with a positive 'oil on water' reaction. In this case, the absence of an odour however does not mean that the 'oil on water' test also has to be negative. Thus, odour observations only indicate where oil surely is present as an oil phase. Comparisons between odour observations and the results of chemical analyses at gasoline polluted sites indicates that strong odours can be attended with higher concentrations, but overlap is big. Based on separate odour observations therefore, no useful estimation of the concentration can be made. By the way, the use of odour observations is dissuaded on behalf of labour hygienic reasons.

While use of 'oil on water' test as well as odour observations needs support of chemical analysis, investigations have taken place whether the relatively expensive and time consuming laboratory analyses can be replaced with a so-called fieldkit measurement in the field. The correlation between fieldkit measurements and the results of chemical analyses however appeared insufficient to support this.

The precision of the oxygen measurements could not be established because no other alternative methods were used. However the relationship with redox potential has been evaluated. Redox potential reacts to changes in environmental chemical circumstances when oxygen concentration is less than 2 mg/l. So oxygen dominates environmental chemical circumstances and the environment can be defined as aerobe when oxygen concentration is higher than 2 mg/l. As a practical consequence the boundary between the aerobe and anaerobe zone is set at 2 mg/l.

Measurements using the fluorescence probe are easily to execute as part of a probe program. Reproducibility seems reasonable, but is hard to quantify because it is very hard to have two probes next to each other. Moreover, the second measurement probably is influenced by the first one. On account of the relatively large distances between the probes, the differences between the duplicate measurements seem to be caused by spatial heterogeneity.

Besides the easy practicability and the reasonable reproducibility, the fluorescence probe has the advantage of a small (detailed) measuring scale, which perfectly fits the scale on which oil is present in the soil, as well as the continuity of the observation set into the depth. These also are advantages of traditional probe data, cone resistance and friction number. Therefore they are convenient to map soil structure on a level of detail, which is relevant to the behaviour of air sparging. The usability of probe data for both mapping the retention zone and soil structure has led to the development of trajectdifferentiation.

Trajectdifferentiation is a statistical method to generate a map of the soil structure out of probe data in a reproducible and controllable way. The method is based on dividing (vertical) data series into relatively homogeneous segments or trajects.

As long as succession of trajects is predictable, the trajects form layers. Trajects within a layer represent clusters of more similar parts of the soil. In contrary tot the location of layers, the location of these clusters is not predictable. The clusters seem to appear randomly within the layer.

Combining cone resistance and the friction number leads to information on the type of soil. The type of soil leads to information on entry pressure and air permeability of a soil-layer. Both

relations are not unambiguous and the interpretation of entry pressure and air permeability from cone resistance and friction number data is surrounded by uncertainty. Nevertheless it is one of the few, or even the only, easy to execute and payable methods to get a detailed picture of the soil.

The vertical division of probe data is based on a split moving window method that locally searches for statistically significant transitions. The extension of 'locally' can be established and is thus arbitrary but also controllable. With respect to the estimation of soil structure in relation to the behaviour of oil and air 'locally' is defined as a depth interval of at most 16 cm.

The size of the local transition is qualified in a 'generalized difference'. To define statistical significance by Student's t-test, the values on which the generalized difference is based, have to be transformed logarithmically beforehand to approach the normal distribution.

Finally, the split moving window method can only be used for one series of data at the time. The set of data however consist of two series, i.c. cone resistance and friction number. Within the developed procedure, these series are combined to one set using principal component analysis. The principal component analysis guarantees that loss of information by combining two series in one will be minimal.

The distinguished trajects in a layer are identified to a class of soil by mean cone resistance and mean friction number. Translation of class of soil to relevant characteristics - entry pressure and air permeability - creates the possibility to identify trajects with relevant deviations of the 'overall' behaviour within the layer. Trajects, that show this kind of behaviour, are ranked as heterogeneities. For every layer the density of heterogeneities can be determined, as well as the minimal and maximal proportions of the heterogeneities.

The use of trajectdifferentiation to design and dimension a remediation variant considering a soil pollution with oil by air sparging, has been processed in the report involving the cluster "Air sparging".

Considering zoning of soil pollution with oil on behalf of air sparging, it is recommendable to collect as much characteristics of the pollution and the soil by using probe techniques and to process the results by using trajectdifferentiation. Probe methods profit by being applicable on a large scale and being payable. Trajectdifferentiation guarantees information on the necessarily detailed scale, while the results are still reproducible and controllable.

HOOFDSTUK 1

WAT IS ZONERING?

Het opstellen van saneringsvarianten is maatwerk. Binnen de geformuleerde saneringsdoelstellingen en locatiespecifieke randvoorwaarden zijn meestal verschillende oplossingen te bedenken, waarbij de keuze van de optimale variant wordt gebaseerd op zowel milieuhygiënische, financiële als maatschappelijke overwegingen. In dit afwegingsproces is het van belang dat alle mogelijke saneringsvarianten binnen het geldende programma van eisen worden geïnventariseerd. Bij het opstellen van saneringsvarianten speelt de geschiktheid van de saneringstechnieken een belangrijke rol. Deze geschiktheid hangt af van de aard van de verontreiniging en van de opbouw van de bodem en de daarin aanwezige fysische, chemische en biologische omstandigheden. Daarnaast kunnen randvoorwaarden worden gesteld door het terreingebruik en de daaraan gekoppelde terreininrichting.

Zonering is het indelen van de bodem in zones waarbinnen een saneringstechniek toepasbaar is. De werkwijze bestaat uit het produceren van afzonderlijke bodemschematisaties die elk een relevant aspect van de toepasbaarheid in beeld brengen. De toepasbare technieken vloeien vervolgens voort uit het combineren van de afzonderlijke schematisaties tot zones, waarbij de karakteristieke kenmerken van de onderscheiden zones worden geconfronteerd met de kritische vuistregels en toepassingsvoorwaarden van de technieken. Het begrip 'zonering' is inmiddels opgenomen in het Handboek Bodemsaneringstechnieken.

Technieken die in beginsel niet geschikt zijn bevonden, worden in de rest van het ontwerpproces buiten beschouwing gelaten. Het is daarom van belang dat bij de selectie geen technieken vallen, die in combinatie met of volgend op andere technieken wel kunnen worden ingepast. Zo kunnen uitsluitend aëroob afbreekbare stoffen in combinatie met persluchtinjectie in een aanvankelijk anaëroobe bodemzone mogelijk toch biologisch worden afgebroken. Daarnaast is een punt van aandacht dat voor de toepassing van verschillende technieken mogelijk eenzelfde karakteristiek in beeld moet worden gebracht, maar dat het detail ervan kan verschillen. Het ontwerpproces moet daarom bij voorkeur een cyclisch karakter hebben, waarbij de geschiktheid van saneringstechnieken na iedere nieuw ontstane situatie opnieuw wordt beoordeeld, maar ook gerelativeerd.

Saneringsvarianten volstaan steeds vaker niet meer met de toepassing van een enkele in situ techniek alleen. Zeker wanneer meer verontreinigende stoffen en meer grondsoorten tegelijkertijd aanwezig zijn, kan beter worden gekozen voor een combinatie van technieken die náást of ná elkaar worden ingezet. Ook zijn varianten denkbaar, waarbij in situ technieken in combinatie met ontgravings- of isolatietechnieken worden uitgevoerd.

De beoordeling van de geschiktheid van een saneringstechniek door zonering heeft altijd een beeld van de aard van de verontreiniging en een beeld van de aard van de bodem. Dit geldt voor het ontwerpen van alle saneringsvarianten, zowel van conventionele ontgravings- en isolatievarianten als van in situ varianten. Veelal blijkt het aantal benodigde karakteristieken en de mate van detail daarvan bij in situ varianten echter wel groter dan bij ontgravings- en isolatievarianten. Zo is een beeld van de aanwezigheid van zuurstof of het detailleren van de bodemopbouw tot gelaagdheden van enkele centimeters alleen relevant voor het beoordelen van de toepasbaarheid van in situ technieken. Daar tegenover staat dat in situ technieken veelal minder beperkingen stellen aan het gebruik en de inrichting van het terrein. Het meer uitgebreide en meer gedetailleerde onderzoek verdient zich dan in de uitvoeringsfase terug.

ZONERING BIJ OLIEVERONTREINIGINGEN

2.1 Relatie met imbibitie en drainage

De sanering van olievertreinigingen wordt vaak in ernstige mate bemoeilijkt doordat de olie in een deel van de bodem in de vorm van kleine olielichaampjes (ter grootte van één of enkele druppeltjes) aanwezig is. Deze olielichaampjes zijn problematisch omdat deze moeilijk verwijderbaar zijn en sterk naleveren aan het grondwater, dat daardoor over een te lange periode van slechte kwaliteit is. De slechte verwijderbaarheid van de olielichaampjes hangt niet alleen samen met de vaak sterke binding van de lichaampjes aan de bodem, maar met name ook door de moeilijkheid om de lichaampjes op te sporen vanwege de kleine trefkans in het gangbare bodemonderzoek. De aanwezigheid van olielichaampjes is derhalve niet alleen een probleem in de saneringsfase maar ook in de zoneringsfase (karteringsfase) die daaraan vooraf gaat.

De theorie van imbibitie en drainage geeft aan dat olie en lucht in de verzadigde zone een voorkeur hebben voor dezelfde poriën. Dit maakt aannemelijk dat perslucht, die in de bodem wordt geïnjecteerd, een grote kans heeft de achtergebleven olielichaampjes in de bodem te 'ontmoeien'. Het toepassen van persluchtinjectie in de saneringsfase omzeilt daarmee het probleem van de moeizame 'exacte' lokalisatie van ieder afzonderlijk olielichaampje in de zoneringsfase. Zonering van de olievertreiniging kan zich dan beperken tot het in beeld brengen van de omvang en de ligging van de retentiezone. De achtergrond van de theorie van imbibitie en drainage is uitgewerkt in hoofdstuk 4 van het hoofdrapport. Een korte samenvatting, in relatie tot de wijze waarop een olievertreiniging in de bodem aanwezig is, is gegeven in hoofdstuk 3 (Denkkader).

2.2 Zoneringskarakteristieken

In het saneringsconcept van olievertreinigingen met perslucht is het onderscheid tussen de retentie- en de retardatiezone en tussen de aërobe en de anaërobe zone van belang. Het onderzoek in deze cluster "Zonering" is derhalve gericht op het ontwikkelen van methoden om de grens tussen de retentie- en de retardatiezone en de grens tussen de aërobe en anaërobe zone in beeld te brengen.

Daarnaast is voor de retentiezone ook de aard van de olie van belang. De wijze waarop deze kan worden vastgesteld, is uitgewerkt in de oliekaracterisering. Deze is beschreven in de deelrapportage inzake de cluster "Olie".

Feitelijk is bij het ontwerpen van een saneringsvariant van een olievertreiniging nog een grens van belang, namelijk de grens tussen de retardatiezone en de 'schone bodem'. Het vaststellen van deze grens is veelal het doel van ieder nader onderzoek en vormt in de praktijk geen groot probleem. Het is derhalve niet als aandachtspunt in het onderzoek opgenomen.

De retentiezone is gedefinieerd als het gedeelte van de bodem waarin olie als afzonderlijke oliefase aanwezig is. De retentiezone onderscheidt zich daarmee van de retardatiezone waarin de olie niet als fase voorkomt, maar uit afzonderlijke oliecomponenten bestaat die ieder afzonderlijk opgelost zijn in de lucht- of waterfase of zijn gesorbeerd aan de vaste fase.

In het uitgevoerde onderzoek is nagegaan in hoeverre zonering van de retentiezone mogelijk is aan de hand van de olie-op-watertest, geurwaarnemingen, fieldkit- en fluorescentiemetingen. De resultaten zijn beschreven in hoofdstuk 4 (Retentie- en retardatiezone).

De aërobe zone van de bodem is ten behoeve van dit onderzoek gedefinieerd als het gedeelte van de bodem waarin de zuurstofconcentratie in de waterfase groter is dan of gelijk is aan 2 mg/l. De anaërobe zone is het overige gedeelte waarin de zuurstofconcentratie dus lager is dan 2 mg/l. De gestelde concentratiegrens is arbitrair en nader onderbouwd bij de beschrijving van de onderzoeksresultaten in hoofdstuk 5 (Aërobe en anaërobe zone).

De meest directe methode voor het vaststellen van de aërobe en de anaërobe zone is het meten van de zuurstofconcentratie in het bodemvocht. In het uitgevoerde onderzoek is dit gedaan met behulp van een zuurstofsonde. Daarnaast zijn metingen verricht met een redoxsonde. Deze stelt de redoxpotentiaal van het bodemvocht vast. De redoxpotentiaal geeft de aanwezigheid van zuurstof mogelijk indirect weer.

Het proces van imbibitie en drainage wordt gedomineerd door de druk die nodig is om stroming door een laag te veroorzaken. Anders dan bij éénfasestroming, waarbij ieder drukverschil stroming veroorzaakt, hoe groot de weerstand van de laag ook is, moet bij de stroming van twee verschillende fasen (olie en water of lucht en water) ten minste een druk aanwezig zijn die groot genoeg is om de capillaire krachten tussen het water en de bodemmatrix te overwinnen. Deze benodigde druk wordt intreedruk (P_{int}) genoemd.

Stagnatie van luchtstroming treedt op wanneer een slechter doorlatende laag een beter doorlatende laag opvolgt en de druk in de lucht de intreedruk van de slechter doorlatende laag niet overschrijdt. De mate waarin de voor intree in de slechter doorlatende laag benodigde druk kan worden opgebouwd, hangt af van de weerstand in de beter doorlatende, onderliggende laag tegen de verplaatsing van water door de lucht. Deze hangt op zijn beurt samen met de mate waarin de reeds opgebouwde druk in deze laag kan wegvloeien. Voor het proces van imbibitie en drainage zijn daarom naast de intreedruk van de slecht doorlatende laag ook de doorlatendheden in horizontale en verticale richting (K_{hor} en K_{vert}) van de beter doorlatende lagen van belang. Al deze kenmerken worden vooralsnog afgeleid uit hun relatie met de grondsoort. Op de reden hiervan en de wijze waarop dit kan gebeuren, wordt nader ingegaan in hoofdstuk 7 (Bodemkarakterisering vanuit persluchtperspectief).

HOOFDSTUK 3

DENKKADER

3.1 Imbibitie en drainage bij verontreinigingen met olie

Olie, die in de bodem terechtkomt, verplaatst zich onder invloed van de zwaartekracht door de onverzadigde zone naar beneden en verdringt daarbij water en lucht. In een bodem met olie, water en lucht is water in eerste instantie de wetting-vloeistof. De gronddeeltjes vullen derhalve een zo groot mogelijk deel van hun oppervlak met water. Voor de onverzadigde zone betekent dit dat ieder gronddeeltje omgeven is met een filmpje van water.

Voor een gronddeeltje met een waterfilmpje is vervolgens olie de wetting-vloeistof. De natte gronddeeltjes vullen op hun beurt een zo groot mogelijk deel van hun oppervlak met olie. De maximale hoeveelheid olie die op deze wijze tegen de zwaartekracht in kan worden vastgehouden, is de restverzadiging van de onverzadigde zone.

Als de hoeveelheid olie, die in de bodem infiltreert, groter is dan de restverzadiging van de onverzadigde zone, bereikt het oliefront het grondwaterniveau. Afhankelijk van de druk op het indringingspunt kan de olie een eindje daarin doordringen (drainage) of zal deze als een drijfslag uitspreiden over de grondwaterspiegel.

De grondwaterstand in Nederland fluctueert voortdurend. Wanneer de grondwaterspiegel daalt, verplaatst de drijfslag mee. In een bodem met olie en water is olie de non-wetting-vloeistof en is de verdringing van water door olie bij dalende grondwaterstand een drainageproces. Olie verdringt water het eerst waar de capillaire druk klein is, dat wil zeggen in de grootste poriën. Wanneer een groot volume olie volgt, ontstaat een drainagefront waarbij ook het water in kleinere poriën wordt verdrongen. In de kleinste poriën kan water ingesloten raken, terwijl het zich tevens als een filmpje rond de gronddeeltjes en op de contactpunten tussen de deeltjes zal (blijven) bevinden.

Wanneer de grondwaterstand weer stijgt, stijgt de drijfslag mee. Het verdringen van olie door water is een imbibitieproces en het water verdringt de olie dus het eerst op plekken waar de capillaire druk groot is, dat wil zeggen in de kleinste poriën. In grotere poriën kan olie door het opdringende water worden ingesloten, waarbij niet alleen afzonderlijke oliedruppels kunnen worden gevormd maar ook groepen poriën met olie kunnen worden afgesloten van andere poriën met olie. Door het gecombineerde proces van drainage bij dalende en van imbibitie bij stijgende grondwaterstand ontstaat een smeerzone waarin olie in grotere poriën is ingesloten.

Op moleculaire schaal treedt uitwisseling op van oliecomponenten tussen de verschillende bodemfasen. Met name de beter oplosbare componenten kunnen zich daarna met het grondwater of de bodemlucht verplaatsen tot buiten de zone waarin olie als pure fase aanwezig is. Hier treedt sorptie op aan de vaste fase van de bodem, waardoor de concentraties in het grondwater en de bodemlucht afnemen en de gehalten in de vaste fase stijgen. Zodra de concentraties in het aangevoerde water of de aangevoerde lucht afnemen, keert het sorptieproces om, waarbij de vaste fase oliecomponenten afstaat aan het langstromende water of de langstromende lucht.

Samenvattend kan een bodemverontreiniging met olie worden beschreven aan de hand van zones, waarin het gedrag van olie door verschillende processen wordt beheerst. Dit betreft drie typen retentiezone (1, 2 en 3), waarin olie als afzonderlijke fase aanwezig is, en twee typen retardatiezone (4 en 5) waarin olie niet als afzonderlijke fase voorkomt:

1. een lekzone waarin de olie zich heeft verplaatst naar de grondwaterspiegel en als restverzadiging is achtergebleven;
2. een drijfslaag op de grondwaterspiegel;
3. een smeerlaag onder de grondwaterspiegel waar olie door fluctuerende grondwaterstand ingesloten is geraakt in grotere poriën;
4. een retardatiezone onder de grondwaterspiegel waar oplosbare oliecomponenten door grondwatertransport zijn terechtgekomen;
5. een retardatiezone boven de grondwaterspiegel waar vluchtige en oplosbare componenten door luchtstroming en watertransport zijn terechtgekomen.

De ligging van de verschillende zones is schematisch weergegeven in figuur 1.

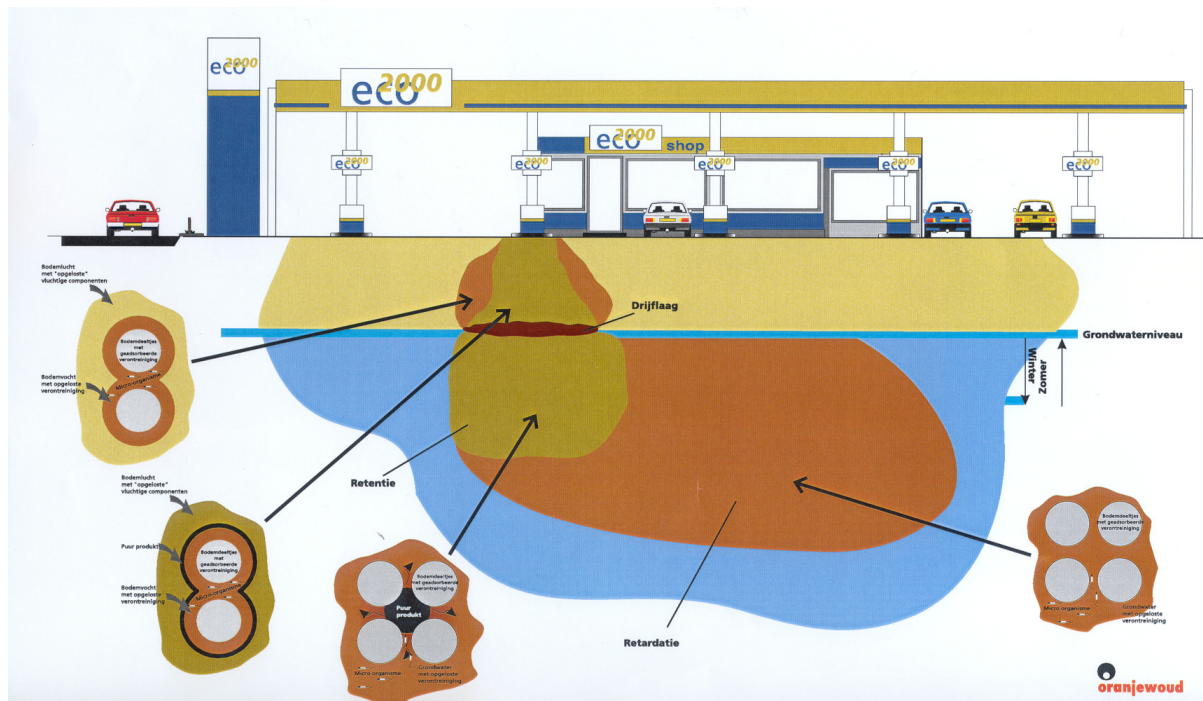


Fig. 1. Zones voor de karakterisering van een olieverontreiniging.

De biologische afbreekbaarheid van olie hangt af van de aanwezigheid van micro-organismen, de beschikbaarheid en de aard van de oliecomponenten en de aanvoer van zuurstof. Afbraak treedt vooral op waar de retardatiezone samenvalt met de aërobe zone en biologische in situ saneringsmaatregelen zijn erop gericht deze omstandigheden in een zo groot mogelijk deel van de bodem te realiseren.

Aandachtspunten zijn derhalve het omvormen van een retentiezone in een retardatiezone en het vergroten van de aërobe zone ten koste van de anaërobe zone.

3.2 Heterogeniteit

Structurele en random verschillen

Het gedrag van olie en perslucht in de bodem wordt grotendeels bepaald door de bodemstructuur. Deze is gedefinieerd als de ruimtelijke rangschikking, vorm en grootte van de elementaire bodembestanddelen en hun eventuele aggregaten alsmede van de holten daartussen [Locher en De Bakker, 1991]. De beschrijving van de bodemstructuur maakt gebruik van een indeling van de bodem in lagen (horizonten). Tussen de lagen zijn de verschillen groter dan binnen de lagen, maar dit betekent niet dat er binnen de lagen geen verschillen aanwezig zijn. De laatste verschillen zijn echter 'structureel', 'diffuus' of 'random'. Een voorbeeld van structurele en diffuse verschillen in de bodem is geïllustreerd in figuur 2.

De overgang van structurele verschillen tussen lagen naar random verschillen binnen lagen verloopt geleidelijk. Een stochastische beschrijving van de bodem kan daarom behulpzaam zijn om enerzijds de significantie van de structureel geachte verschillen tussen de lagen aan te geven en anderzijds de als resterende ruis beschouwde random verschillen binnen de lagen te kwantificeren.

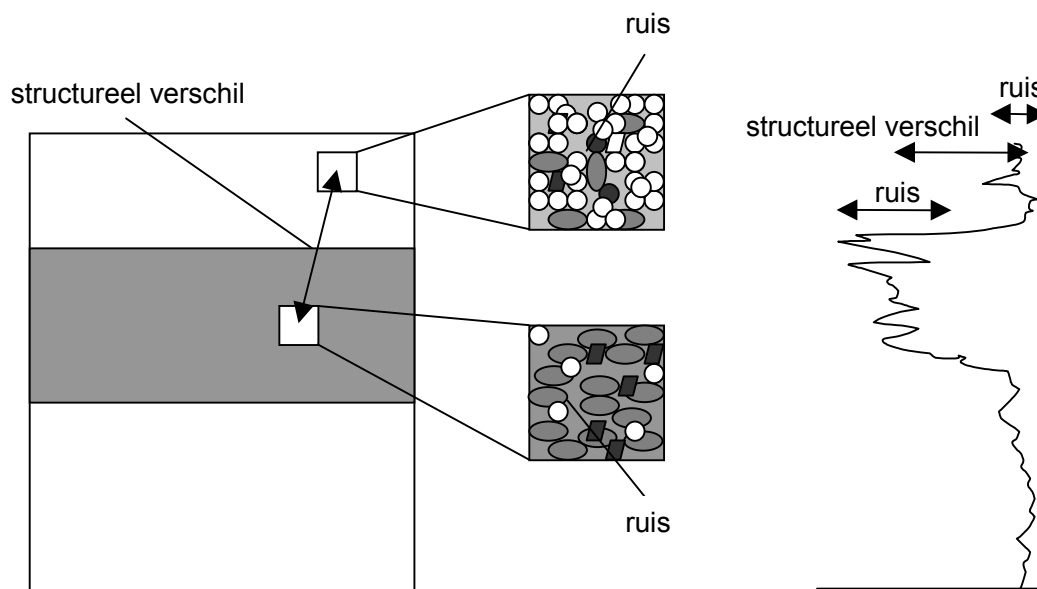


Fig. 2. Verdeling van verschillen in bodemkwaliteit over structurele verschillen tussen lagen en random verschillen binnen lagen.

Variatie

Een stochastische maat voor verschillen is de variantie. De variantie is een kenmerk van een statistische populatie en heeft alleen betekenis indien deze populatie op zijn beurt is gedefinieerd als een verzameling van eenheden waarvan duidelijk moet zijn wát een eenheid is en wélke eenheden gezamenlijk de populatie vormen.

De eenheden zullen doorgaans de grootte hebben van een gedeelte van de bodem waarin of waaráán een bepaalde relevante eigenschap kan worden gemeten. De populatie zal in eerste instantie alle eenheden omvatten die zich in het bodemsysteem tot een zekere diepte en met een zekere horizontale begrenzing bevinden. De variantie is dan een maat voor de verschillen die op meetschaal binnen dit bodemsysteem aanwezig zijn.

In tweede instantie kunnen binnen bodemsystemen vaak lagen worden onderscheiden. De lagen vormen deelpopulaties waarbinnen het kenmerk minder variatie vertoont dan binnen de populatie als geheel. De relevantie van het definiëren van de deelpopulaties is dan dat op grond van de ligging van een bodemgedeelte in een bepaalde laag de betreffende relevante eigenschap nauwkeuriger kan worden geschat dan indien geen indeling in deelpopulaties had plaatsgevonden. Vanuit statistische oogpunt bekeken wordt de totale variantie van het gehele bodemsysteem (populatie) verdeeld over een variantie tussen de lagen (deelpopulaties) en een resterende variantie binnen de lagen. Bij een zinvolle indeling in lagen zijn de varianties binnen de deelpopulaties significant kleiner dan de verschillen tussen de deelpopulaties.

De grootte van de bodemeenheden, waarin of waaraan wordt gemeten, hoeft niet altijd de meest geschikte eenheid te zijn voor het beschrijven van een bodemkenmerk. Het is wel altijd de kleinste eenheid waarvoor dit mogelijk is. Desgewenst kunnen echter ook grotere eenheden worden gedefinieerd, die dan uit twee of meer meeteenheden bestaan. De variantie op deze grotere schaal is dan kleiner dan de aanvankelijke variantie op meetschaal.

Lagen, heterogeniteiten en ruis

De essentie van het gebruik van varianties in de beschrijving van bodemsystemen ligt in het onderscheiden van structurele verschillen tussen de lagen en het toekennen van de resterende verschillen aan heterogeniteiten en ruis binnen de lagen. Het verschil tussen structurele verschillen aan de ene kant en random verschillen in heterogeniteiten en ruis aan de andere kant ligt in de voorspelbaarheid. Structurele verschillen zijn eenduidig aan bepaalde bodemgedeelten toe te kennen en kunnen om die reden dan ook aan lagen worden gekoppeld. Voor heterogeniteiten en ruis kan slechts de kans op de aanwezigheid en/of de kans op een afwijking van een bepaalde grootte worden aangegeven.

De onzekerheid die voortvloeit uit 'de heterogeniteit van de bodem' bestaat daarmee uit de fout die wordt gemaakt bij het schatten van de ligging en de aard van de bodemlagen en uit het stochastische karakter van de ligging en de aard van heterogeniteiten en ruis.

Lagen worden dus onderscheiden op basis van structurele verschillen tussen de deelpopulaties van de bodem en vormen eenduidig te definiëren, aaneengesloten gedeelten daarvan. Binnen de lagen is de variantie 'random'. Daarin kan echter wel een hiërarchie aanwezig zijn. Het kan zijn dat elementaire eenheden met een afwijkend kenmerk gegroepeerd in een laag voorkomen zonder dat de aanwezigheid van deze gegroepeerde eenheden aan een specifieke plek binnen de laag kan worden toegekend. Zij vormen dan random aanwezige heterogeniteiten binnen de laag die op hun beurt, evenals de resterende 'bulk' van de laag, op de kleinere schaal van de elementaire eenheden ook weer heterogeen zijn.

3.3 Nauwkeurigheid, reproduceerbaarheid en precisie

De nauwkeurigheid van een meettechniek voor de totstandkoming van een zonering wordt bepaald door de reproduceerbaarheid en de precisie van de meting. Een meting is goed reproduceerbaar wanneer verschillende metingen aan hetzelfde object of systeem slechts kleine verschillen in meetresultaten vertonen. Een goed reproduceerbare meting hoeft echter nog niet de juiste waarde van het betreffende object of systeem weer te geven. De mate waarin dit het geval is, wordt uitgedrukt in de precisie. Dit is geïllustreerd in figuur 3.

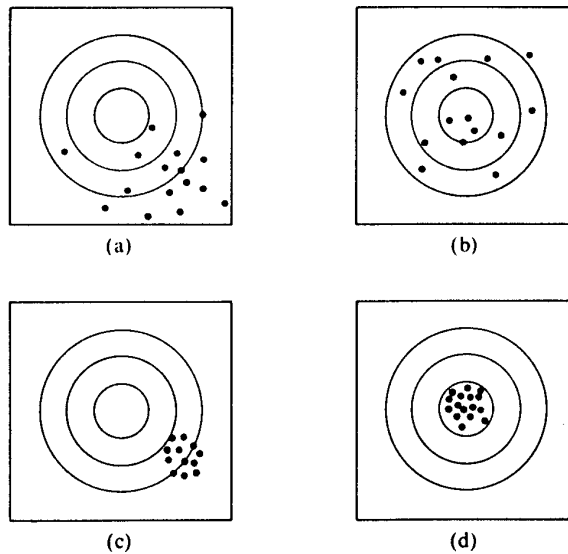


Fig. 3. Relatie tussen reproduceerbaarheid (RP), precisie (PC) en nauwkeurigheid (NK). (a): RP klein + PC klein = NK klein; (b): RP klein + PC groot = NK klein; (c): RP groot + PC klein = NK klein; (d) RP groot + PC groot = NK groot (naar [Jessen, 1978]).

De nauwkeurigheid waarmee de *omvang* van een zone is vastgesteld, is in dit onderzoek gerelateerd aan het verschil tussen twee afzonderlijke volumeschattingen en gedefinieerd als:

$$NK_o = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{\bar{A}} \right) \cdot 100 \%$$

waarin:

- NK_o is de nauwkeurigheid van de omvang (%);
- $A_1 - A_2$ is het verschil in volumeschattingen 1 en 2 (m^3);
- \bar{A} is het gemiddelde van volumeschattingen 1 en 2 (m^3).

Naast de nauwkeurigheid, waarmee de omvang van een zone is vastgesteld, is ook de nauwkeurigheid van belang waarmee de *ligging* van de zone is vastgesteld. Wanneer twee uitvoeringen van hetzelfde meetprogramma weliswaar eenzelfde schatting van de omvang van een zone opleveren, maar deze zones in verschillende bodemdeelten van de locatie positioneren, is de waarde van de zoneringsmethode zeer beperkt. De nauwkeurigheid waarmee de ligging van de zone in beeld is gebracht, is in dit onderzoek gerelateerd aan de omvang van het overlappende deel van twee afzonderlijke volumeschattingen van de zone en gedefinieerd als:

$$NK_l = \left(1 - \frac{A_1 \cap A_2}{\bar{A}} \right) \cdot 100 \%$$

waarin:

- NK_l is de nauwkeurigheid van de ligging (%);
- $A_1 \cap A_2$ is de doorsnede van de volumeschattingen 1 en 2 (m^3).

HOOFDSTUK 4

RETENTIE- EN RETARDATIEZONE

4.1 Olie-op-watertest

Een grondmonster wordt in een detectiepan ondergedompeld in water, waarna de vorming van een (olie)filmpje op het wateroppervlak wordt geregistreerd. De vorming van het filmpje is het gevolg van het imbibitieproces waarmee water olie uit de poriën van het grondmonster verdringt. Een positieve olie-op-waterreactie duidt derhalve op de aanwezigheid van een oliefase in het grondmonster en is daarmee indicatief voor de retentiezone.

Het grondmonster heeft doorgaans een grootte van enkele grammen en wordt veelal discontinu uit het bodemprofiel genomen. De nauwkeurigheid waarmee de retentiezone derhalve wordt vastgesteld, hangt naast de betrouwbaarheid van de olie-op-watertest ook af van de meetdichtheid. Olie-op-watertests zijn uitgevoerd op de locaties Hoofdweg Damwoude, Gerwenseweg Helmond, Vreelandseweg Hilversum en Heereweg Midsland. De olie-op-waterreacties zijn vermeld bij de profielbeschrijvingen zoals die zijn opgenomen in het bijlagenrapport van fase 1.2.

Reproduceerbaarheid

De olie-op-watertest is gebaseerd op een visuele waarneming. Deze is subjectief en daardoor in theorie niet volledig reproduceerbaar. In de praktijk blijkt de beoordeling van de olie-op-waterreactie echter weinig discussie op te leveren. Bij benzine echter, dient snel na het onderdompelen te worden beoordeeld omdat een eventueel gevormd filmpje door vervluchtiging ook weer snel kan verdwijnen. Daarnaast bestaat bij de olie-op-watertest het risico van storing door humusachtige verbindingen. Dit betreft echter niet zozeer de waarneming als wel de interpretatie daarvan.

De reproduceerbaarheid is onderzocht door op alle locaties door twee meetploegen op twee verschillende dagen volgens eenzelfde monsternemingsstrategie olie-op-watertests te laten uitvoeren. De resultaten zijn opgenomen in bijlage A en samengevat in tabel 1.

Tabel 1. Aantallen positieve en negatieve olie-op-waterreacties op (vrijwel) dezelfde locatie maar geregistreerd door verschillende waarnemers op verschillende dagen.

		serie B		
		positief	negatief	totaal
serie A	positief	23	2	25
	negatief	2	16	18
	totaal	25	18	43

Uit tabel 1 volgt dat beide meetploegen in 23 van de 43 gevallen tot eenzelfde positieve beoordeling en in 16 gevallen tot eenzelfde negatieve beoordeling kwamen. In vier gevallen is er sprake van een afwijkende beoordeling door de waarnemers. De reproduceerbaarheid van de olie-op-watertest bedraagt derhalve circa 90 %.

In twee van de vier gevallen, waarin sprake is van een verschillende beoordeling, gaat de verschillende uitslag van de olie-op-waterreactie gepaard met een duidelijk verschil in zintuiglijke waarnemingen. De oorzaak van de verschillende beoordeling van de olie-op-waterreactie moet

daarom eerder in ruimtelijke variatie worden gezocht dan in een slechtere reproduceerbaarheid van de waarnemingsmethode.

Precisie

De precisie van de olie-op-watertest is onderzocht door op dezelfde vier locaties de olie-op-waterreactie van grondmonsters te vergelijken met de analytisch bepaalde gehalten daarin. De resultaten zijn weergegeven in figuur 4. Uit deze figuur blijkt dat positieve olie-op-waterreacties optreden vanaf gehalten van 100 mg/kg aan C₆ - C₄₀. Slechts in één monster is bij een gehalte van 27 mg/kg al een positieve olie-op-waterreactie geconstateerd (Vreelandseweg Hilversum). Negatieve olie-op-waterreacties zijn in het algemeen indicatief voor gehalten die lager zijn dan 300 mg/kg aan C₆ - C₄₀. Alleen op de locatie Heereweg Midland zijn bij negatieve olie-op-waterreacties de gehalten in vier monsters toch hoger (hoogste gehalte 682 mg/kg).

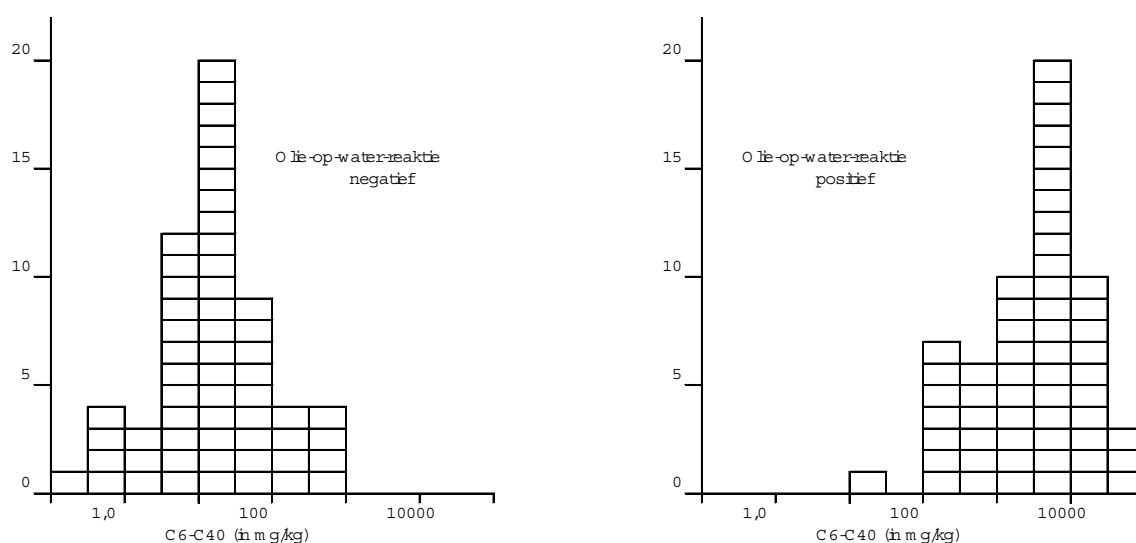


Fig. 4. Verdeling van het aantal monsters in de categorieën met en zonder olie-op-waterreactie naar het gehalte aan C₆ - C₄₀.

De resultaten duiden op een logische relatie tussen de olie-op-waterreactie en het analytisch bepaalde gehalte in de grond. Dit bewijst niet, maar maakt wel aannemelijk dat op basis van de olie-op-waterreactie een onderscheid tussen de retentiezone en de retardatiezone kan worden gemaakt.

De olie-op-waterreactie is al positief vanaf gehalten die niet ver boven het niveau liggen waarbij grond als 'schoon' wordt gekwalificeerd. Dit duidt erop dat olie een voorkeur heeft om als afzonderlijke oliefase achter te blijven en vermoedelijk veel vaker als oliedruppeltjes aanwezig is dan waarvan in gangbare denkmodellen wordt uitgegaan.

4.2 Geurwaarnemingen

Van de uitgevoerde boringen zijn profielbeschrijvingen gemaakt, waarbij naast de grondsoort en de kleur ook bijzonderheden als bijmengingen en geuren zijn genoteerd. Met name geuren zijn vaak positief gecorreleerd met het gehalte aan olieachtige stoffen en worden daarom veel gebruikt om olieverontreinigingen in kaart te brengen. Momenteel wordt het verrichten van geurwaarnemingen uit oogpunt van arbeidshygiëne echter afgeraden en wordt er gewerkt aan het ontwikkelen van vervangende waarnemingsmethoden.

Van deze methoden lijkt de methode die gebruikt maakt van een PID-meter (Photo-Ionisatie-Detectie-meter) het meestbelovend. Aan de mogelijkheden van het gebruik van de PID-meter is in dit onderzoek geen aandacht besteed. Geurwaarnemingen zijn verricht op alle locaties en zijn vermeld bij de profielbeschrijvingen zoals die zijn opgenomen in het bijlagenrapport van fase 1.2.

Reproduceerbaarheid

Evenals de olie-op-watertest zijn geurwaarnemingen subjectief en daardoor in theorie niet volledig reproduceerbaar. In de praktijk blijkt de beoordeling van geurwaarnemingen meer discussie op te leveren dan de beoordeling van de olie-op-waterreactie. Evenals de olie-op-watertest zijn ook geurwaarnemingen gevoelig voor storende invloeden, zoals de aanwezigheid van andere geuren dan die welke samenhangen met de aanwezigheid van olie.

De reproduceerbaarheid is onderzocht door op de locaties Hoofdweg Damwoude, Gerwenseweg Helmond, Vreelandseweg Hilversum en Heereweg Midslaan door twee meetploegen op twee verschillende dagen volgens eenzelfde monsternemingsstrategie boringen te laten uitvoeren. Geurwaarnemingen worden doorgaans geclassificeerd als 'geen', 'licht', 'matig' en 'sterk'. Dit onderscheid kan van belang zijn voor een detaillering van de mate van verontreiniging. De reproduceerbaarheid van de beoordeling is weergegeven in tabel 2.

Tabel 2. Aantallen geurwaarnemingen op (vrijwel) dezelfde locatie maar geregistreerd door verschillende waarnemers op verschillende dagen.

		serie B				
		geen	licht	matig	sterk	totaal
serie A	geen	16	1	0	0	17
	licht	0	11	1	1	13
	matig	1	0	8	1	10
	sterk	1	0	0	3	4
	totaal	18	12	9	5	44

De reproduceerbaarheid van de geurwaarnemingen bedraagt circa 86 %. In drie gevallen is het verschil echter te wijten aan een min of meer subtiel verschil in beleving van de geursterkte: in deze gevallen beoordeelt de ene ploeg een geur als licht, terwijl de andere ploeg deze matig noemt. In de drie overige gevallen is er naast de afwijkende geurbeoordeling ook sprake van een afwijkende olie-op-waterreactie. De oorzaak van de grote verschillen in geurwaarneming moet voor deze laatste gevallen dan ook eerder worden gezocht in ruimtelijke variatie dan in een slechtere reproduceerbaarheid van de waarnemingsmethode.

Precisie

De precisie van de geurwaarnemingen is onderzocht door op de genoemde vier locaties de geurwaarnemingen te vergelijken met de olie-op-waterreactie van dezelfde laag. De resultaten zijn weergegeven in de tabellen 3 t/m 6.

Uit de tabellen 3 en 5 valt af te lezen dat bij aanwezigheid van een verontreiniging met lichtere oliesoorten (benzine) er een tendens is van geen of lichte geuren bij negatieve en matige of sterke geuren bij positieve olie-op-waterreactie. Matige en sterke (benzineachtige) geuren duiden bij verontreinigingen met lichte oliesoorten derhalve op de aanwezigheid van een retentiezone.

Tabel 3. Aantallen geurwaarnemingen onderscheiden naar sterkte in relatie tot de olie-op-waterreactie op de locatie Hoofdweg Damwoude.

Damwoude (benzinegeur)		geurwaarneming			
		geen	licht	matig	sterk
olie-op-waterreactie	negatief	13	6	3	1
	positief	0	0	3	8

Tabel 4. Aantallen geurwaarnemingen onderscheiden naar sterkte in relatie tot de olie-op-waterreactie op de locatie Gerwenseweg Helmond.

Helmond (oliegeur)		geurwaarneming			
		geen	licht	matig	sterk
olie-op-waterreactie	negatief	2	0	0	0
	positief	0	16	0	0

Tabel 5. Aantallen geurwaarnemingen onderscheiden naar sterkte in relatie tot de olie-op-waterreactie op de locatie Vreelandseweg Hilversum.

Hilversum (afwijkende/benzinegeur)		geurwaarneming			
		geen	licht	matig	sterk
olie-op-waterreactie	negatief	10	7	1	0
	positief	0	1	15	0

Tabel 6. Aantallen geurwaarnemingen onderscheiden naar sterkte in relatie tot de olie-op-waterreactie op de locatie Heereweg Midsland.

Midsland (oliegeur)		geurwaarneming			
		geen	licht	matig	sterk
olie-op-waterreactie	negatief	14	0	0	0
	positief	9	3	2	0

De mate waarin geurwaarnemingen kunnen worden gebruikt om onderscheid te maken tussen de retentie- en de retardatiezone is voor de beide locaties, waar sprake is van een benzineverontreiniging, nader bekeken door de geurwaarnemingen te vergelijken met de analytisch bepaalde gehalten in grondmonsters van dezelfde laag. De resultaten zijn weergegeven in figuur 5.

Uit figuur 5 blijkt dat monsters waarin matige of sterke, benzineachtige geuren zijn vastgesteld vaker hoge gehalten aan $C_6 - C_{40}$ bevatten. De overlap tussen beide categorieën is echter groot en omvat het traject van 3 tot 300 mg/kg. De precisie van geurwaarnemingen om de grens tussen de retentie- en de retardatiezone aan te geven is daarom gering. In grote lijnen kan worden gesteld dat matige en sterke benzinegeuren gepaard gaan met gehalten aan $C_6 - C_{40}$ van meer dan 300 mg/kg en duiden op een retentiezone. Geen of lichte benzinegeuren duiden in het algemeen op gehalten die lager zijn dan 100 mg/kg en op een ligging buiten de retentiezone.

Uit de tabellen 4 en 6 blijkt dat een (diesel)oliegeur altijd gepaard gaat met een positieve olie-op-waterreactie. De aanwezigheid van een (diesel)oliegeur duidt derhalve op een retentiezone.

Omgekeerd geldt echter niet dat de afwezigheid van een (diesel)oliegeur duidt op een retardatiezone of schone bodem. Bij verontreinigingen met zwaardere oliesoorten, waaronder dieselolie, is de retentiezone niet altijd herkenbaar aan de aanwezigheid van een oliegeur.

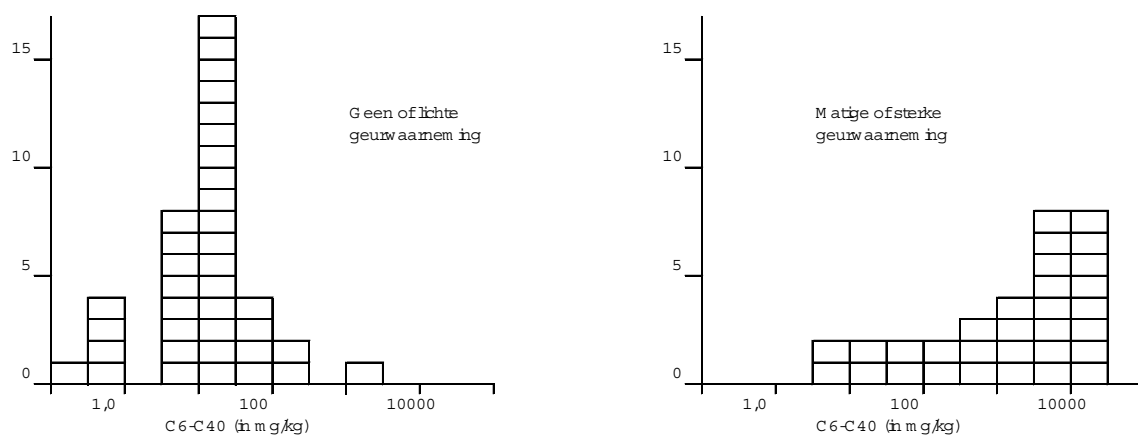


Fig. 5. Verdeling van het aantal monsters in de categorieën met 'geen of lichte geuren' en met 'matige of sterke geuren' naar het gehalte aan C₆ - C₄₀ op twee locaties met een benzineverontreiniging.

4.3 Fieldkit

Uit de voorgaande paragrafen is duidelijk geworden dat zonering van de retentiezone op basis van de olie-op-watertest of zintuiglijke waarnemingen niet volledig zuiver is. Twijfels bestaan bij analytisch bepaalde gehalten lager dan 300 mg/kg. Met name een zonering op basis van geurwaarnemingen behoeft daarom een validatie aan de hand van analytisch bepaalde gehalten. Dit verhoogt de kosten van onderzoek en belemmert een snelle kartering (zonering).

Door Shell Research is een methode ontwikkeld, waarmee op relatief eenvoudige, goedkope en snelle wijze in het veld een indicatie wordt verkregen van het gehalte aan koolwaterstoffen in grond. Bij deze fieldkitmethode wordt een afgewogen hoeveelheid grond geëxtraheerd met pentaan, nadat de grond eerst is gedroogd met Na₂SO₄. Aan het extract worden Al₂O₃ en AlCl₃ toegevoegd die een kleurreactie veroorzaken. De mate van verkleuring wordt gemeten met een spectrofotometer en is een maat voor de aanwezigheid van koolwaterstoffen. Hiertoe wordt de UV-absorptie, zoals die wordt gemeten met de spectrofotometer, geïkht aan de hand van koolwaterstofoplossingen met bekende concentratie. Fieldkitmetingen zijn uitgevoerd op de locaties Hoofdweg Damwoude, Vreelandseweg Hilversum en Heereweg Midsland.

Reproduceerbaarheid

De reproduceerbaarheid van de fieldkitmetingen is onderzocht door op de drie locaties door twee meetploegen op twee verschillende dagen volgens eenzelfde monsternemingsstrategie fieldkitmetingen te laten uitvoeren. De resultaten zijn weergegeven in figuur 6.

Uit figuur 6 volgt dat de reproduceerbaarheid van de fieldkitmetingen gering is, met name in het traject van lage gehalten. Fieldkitmetingen zijn daarmee minder geschikt ter ondersteuning van zoneringen op basis van olie-op-watertests en geurwaarnemingen waarvoor juist deze lagere gehalten aan olie relevant zijn.

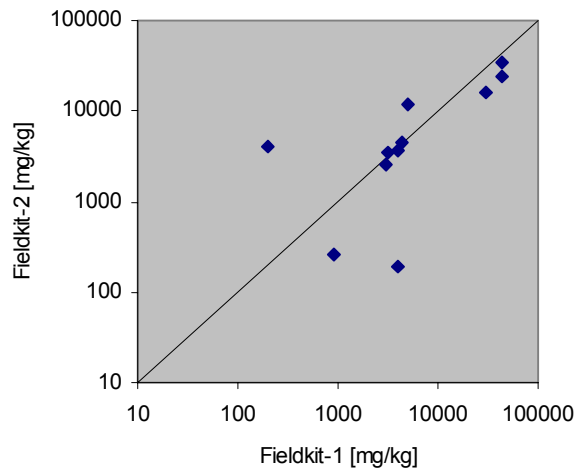


Fig. 6. Gehalten aan olie volgens de fieldkitmethode in duplomonsters.

Precisie

De precisie van de fieldkitmetingen is onderzocht door op dezelfde drie locaties de fieldkitmetingen te vergelijken met chemisch-analytisch bepaalde gehalten in grondmonsters van dezelfde laag. De resultaten zijn weergegeven in figuur 7.

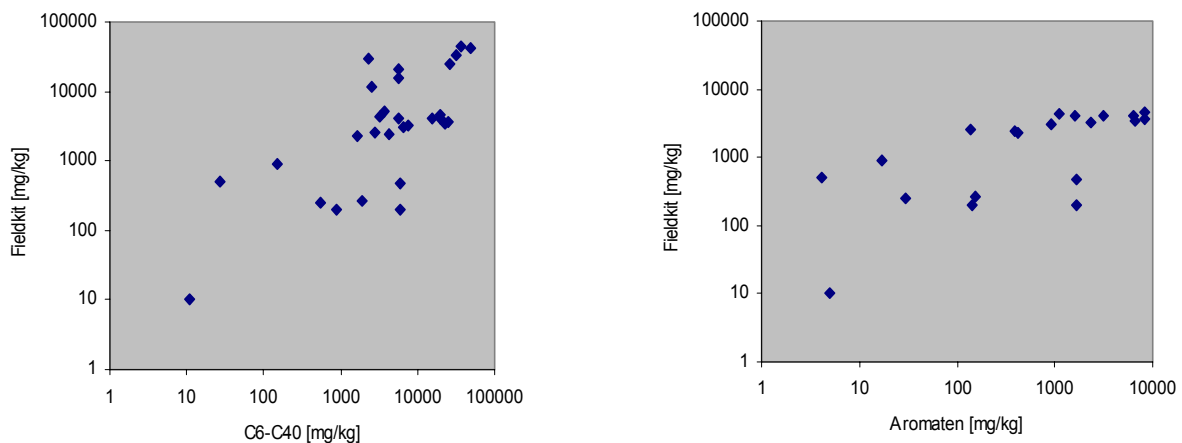


Fig. 7. Verband tussen de gehalten aan olie volgens de fieldkitmethode en volgens de chemisch-analytische bepaling.

Uit figuur 7 blijkt dat de fieldkitmetingen slechts matig gecorreleerd zijn aan het gehalte aan $C_6 - C_{40}$. De correlaties van de fieldkitmetingen met het gehalte aan aromaten en de lichte fractie aan olie ($C_6 - C_{16}$) zijn nog slechter.

Voor de geringe reproduceerbaarheid en de matige correlatie met het gehalte aan olie kunnen een aantal mogelijke oorzaken worden aangegeven.

In de eerste plaats betreft dit de helderheid van de glazen buisjes waarin de UV-absorptie wordt gemeten. Deze is minder constant doordat in het veld nu eenmaal sneller beschadigingen aan het glaswerk (krasjes) optreden en minder schoon kan worden gewerkt dan in het laboratorium. Bovendien blijkt de wijze van plaatsen van de glazen buisjes in de spectrofotometer van invloed op de meting. Naast deze uitvoeringstechnische zaken maakt de fieldkitmethode gebruik van conversiefactoren om de gemeten UV-absorptie om te rekenen naar een gehalte aan olie. Deze conversiefactoren berusten op de aanname dat alleen koolwaterstoffen verantwoordelijk zijn

voor de UV-absorptie en dat voor alle koolwaterstoffen eenzelfde relatie geldt met de concentratie. Dit hoeft niet het geval te zijn en voor een juiste toepassing van de methode wordt door Shell dan ook gesteld dat de samenstelling van de verontreiniging in grote lijnen bekend moet zijn. Op de onderzochte locaties is hiermee niet specifiek rekening gehouden. Tenslotte bleken sommige grondmonsters een afwijkende kleurreactie te veroorzaken en vertoonden sommige extracten een troebeling.

De geringe reproduceerbaarheid en de matige correlatie met het gehalte aan olie maken fieldkit-metingen minder geschikt om de chemisch-analytische bepaling van gehalten aan olie in grond te vervangen.

4.4 Fluorescentie

Polycyclische aromatische structuren fluoresceren indien zij worden bestraald met UV-licht van een korte golflengte (250 - 500 nm). Vanwege de veelvuldige aanwezigheid van polycyclische structuren in olie en brandstofproducten, kan fluorescentie worden gebruikt om de aanwezigheid daarvan in beeld te brengen. Kanttekingen daarbij zijn dat:

- ook andere dan polycyclische aromatische structuren kunnen bijdragen aan de fluorescentie, bijvoorbeeld onverzadigde heterocyclische structuren;
- ook andere bodembestanddelen via dergelijke structuren aan de fluorescentie kunnen bijdragen, bijvoorbeeld organische stof en humuszuren;
- de mate waarin fluorescerende structuren in olie of brandstofproducten voorkomen sterk kan variëren, waardoor de relatie tussen de mate van verontreiniging en fluorescentie niet eenduidig is.

De fluorescentie van bodemlagen kan worden gemeten met een FFD-sonde die in combinatie met sondeerapparatuur kan worden ingezet. In de FFD-sonde is een UV-bron en een detectiesysteem verwerkt. De UV-bron pulseert licht met een instelbare golflengte door een saffiervenster in de grond, waarna het teruggekaatste fluorescentielicht wordt gemeten met een fotobuis. Naast de UV-bron en de fotobuis bevat de sonde nog een hoogspanningsvoeding en een versterker voor het meetsignaal. De golflengte van het UV-licht wordt ingesteld op basis van metingen aan standaardoplossingen.

De fluorescentiemetingen worden via de sondeerkabel samen met eventuele andere gegevens die bij de sondering worden verkregen, waaronder ten minste een diepteregistratie, digitaal opgeslagen in een gegevensbestand. Doorgaans worden zij gepresenteerd in de vorm van fluorescentiediagrammen.

Een belangrijk voordeel van fluorescentiemetingen is de kleine meetschaal in combinatie met de continuïteit van de meetreeks. De meetschaal sluit meer dan enig andere, in de praktijk toepasbare meetmethode goed aan bij de (porie)schaal waarop olie in (de smeerzone van) de bodem aanwezig is. De continuïteit van de meetreeks in de diepte zorgt ervoor dat, ondanks de kleine meetschaal en de daardoor geringe representativiteit van de afzonderlijke meting voor de aanwezigheid van olie op punten die op enige afstand van het meetpunt zijn gelegen, toch een goed beeld wordt verkregen van de verdeling van de fluorescentie over het gehele profiel.

De bruikbaarheid van de FFD-sonde is getest op de locatie Zutphensestraat Brummen. Hier zijn sonderingen in duplo uitgevoerd, waarbij naast de fluorescentiemetingen tevens conusweerstanden en wrijvingsgetallen (kleef) zijn bepaald. De resultaten van acht, in duplo uitgevoerde sonderingen zijn weergegeven in figuur 8 en 9.

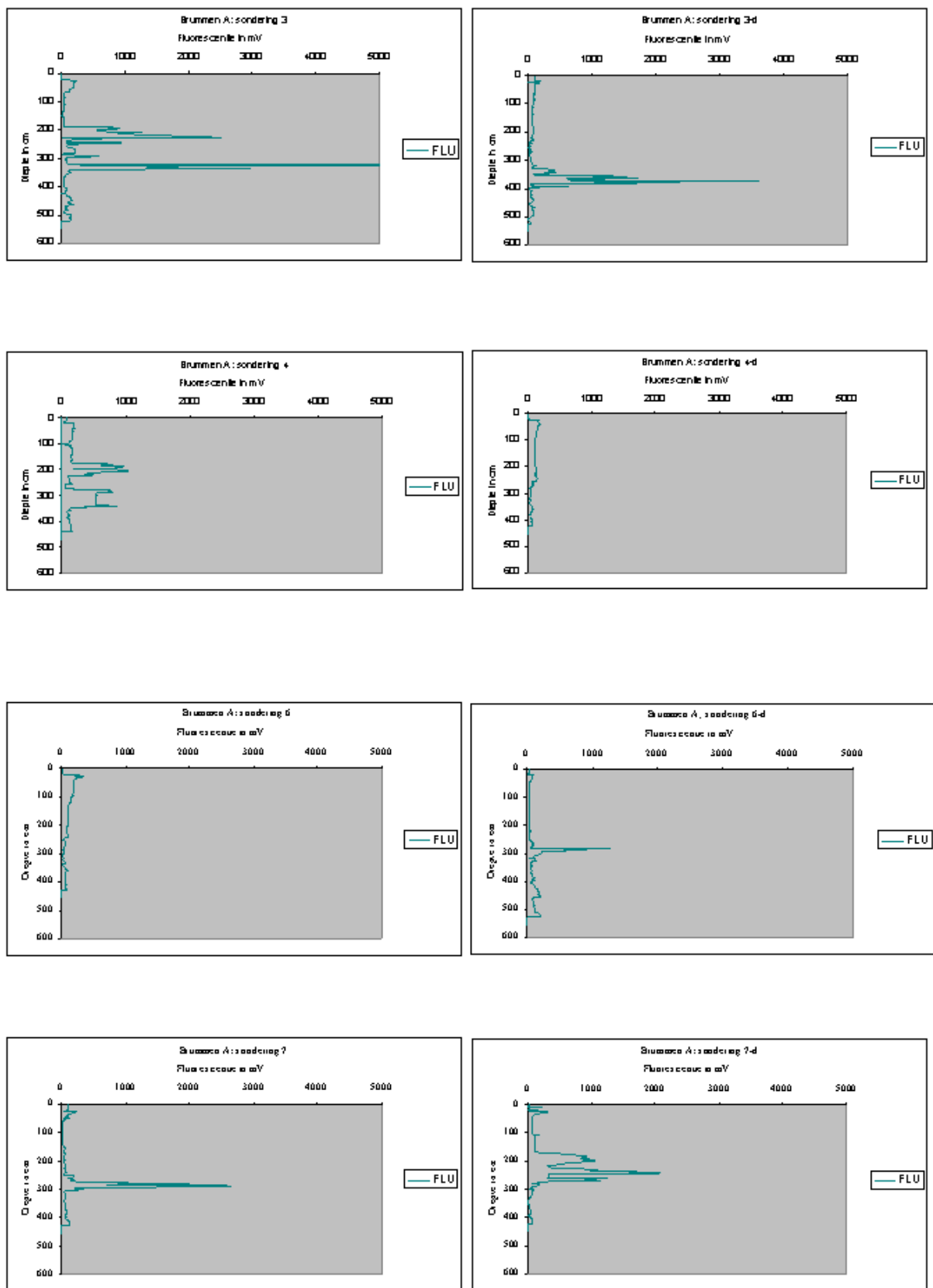


Fig. 8. Fluorescentieprofielen van vier, in duplo uitgevoerde sonderingen op de locatie Zutphensestraat Brummen.

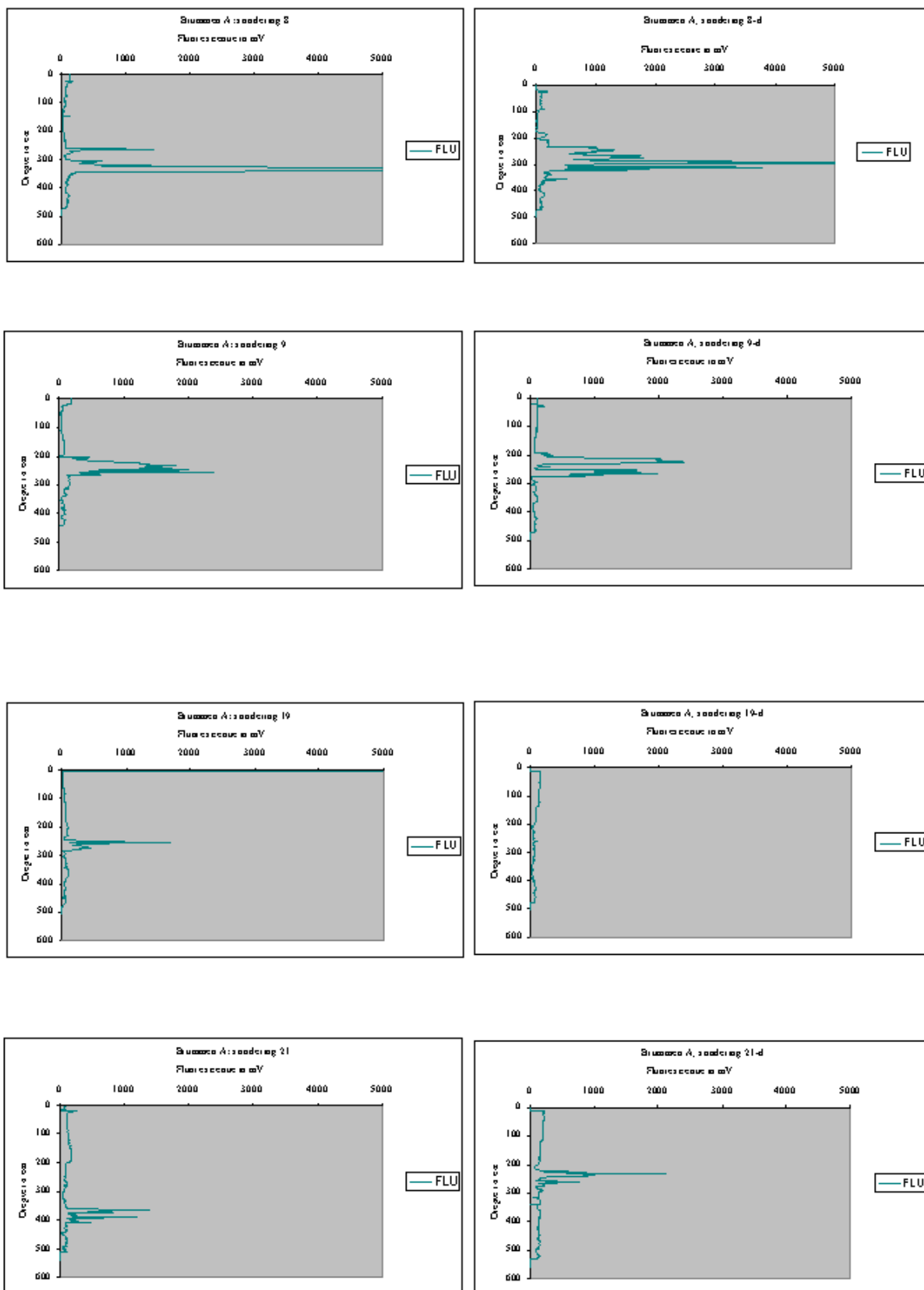


Fig. 9. Fluorescentieprofielen van vier, in duplo uitgevoerde sonderingen op de locatie Zutphensestraat Brummen.

Reproduceerbaarheid

Uit de figuren 8 en 9 blijkt dat de duplometingen voor de sonderingen 3, 7, 8 en 9 een 'redelijk' goed overeenkomstig beeld geven. Zij geven een min of meer overeenkomstige mate van fluorescentie (olie) op min of meer overeenkomstige diepten. Bij de sonderingen 4, 6 en 19 wordt steeds bij één van beide sonderingen lokaal in het profiel wel een verhoogde fluorescentie gemeten, terwijl dat bij de andere sondering dan niet het geval is. Bij sondering 21 tenslotte wordt in beide gevallen een verhoogde fluorescentie gemeten maar op duidelijk afwijkende diepten.

Duplometingen van de fluorescentie zijn moeilijk uit te voeren, omdat sonderingen moeilijk zeer dicht naast elkaar kunnen worden geplaatst. Indien dit lukt, is het niet denkbeeldig dat de resultaten van de duplosondering worden beïnvloed door de eerste sondering. De afstand tussen de duplosonderingen bedroeg derhalve in het algemeen ten minste 2 m. Naar verwachting is een deel van de matige overeenkomst tussen de in duplo uitgevoerde metingen daarom niet zo zeer te wijten aan een kleinere reproduceerbaarheid maar aan ruimtelijke variatie die nu eenmaal in de bodem aanwezig is.

Precisie

De precisie van de fluorescentiemetingen kan niet worden vastgesteld, omdat geen grondmonsters op minerale olie zijn geanalyseerd van bodemgedeelten waarin ook fluorescentiemetingen zijn uitgevoerd.

AËROBE EN ANAËROBE ZONE

5.1 Zuurstofsonde

Door de Rijksuniversiteit Groningen (RUG) is een elektrode ontwikkeld waarmee de zuurstofconcentratie in het bodemvocht kan worden bepaald. Een elektrode bestaat uit drie sensoren die zijn ingebouwd in een sonde. De sensoren registreren een millivoltage dat lineair afhankelijk wordt verondersteld van de zuurstofconcentratie. Deze relatie wordt geïjkt door het millivoltage van een zuurstofverzadigd monster te meten en de zuurstofconcentratie hierin te berekenen aan de hand van de vaste relatie hiervan met de temperatuur. Zuurstofmetingen zijn uitgevoerd op de locaties Vreelandseweg Hilversum en Heereweg Midland. De resultaten zijn opgenomen in bijlage B.

De metingen zijn uitgevoerd door tijdens de boring de sonde op een meer of minder groot aantal diepten enkele centimeters in de bodem van het boorgat te drukken en de geregistreerde waarden van de afzonderlijke sensoren af te lezen. De sensoren bleken erg gevoelig te zijn voor storingen. Er is daarom steeds met twee sondes gewerkt met in totaal zes sensoren. Ook bij het uitvallen van één of meer sensoren waren daardoor toch steeds voldoende meetgegevens voorhanden.

Reproduceerbaarheid

De reproduceerbaarheid van de zuurstofmetingen is onderzocht door op de twee locaties door twee meetploegen op twee verschillende dagen volgens eenzelfde monsternemingsstrategie zuurstofmetingen te laten uitvoeren. De resultaten zijn weergegeven in figuur 10.

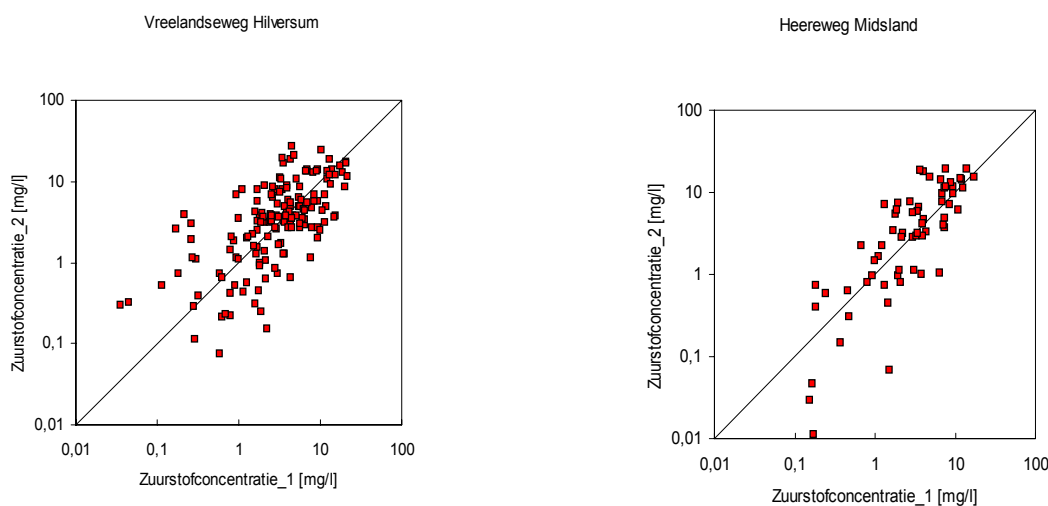


Fig. 10. Zuurstofconcentraties zoals gemeten met de zuurstofsonde in duplomonsters.

Uit figuur 10 volgt dat de zuurstofmetingen maar matig reproduceerbaar zijn: op de locatie Vreelandseweg Hilversum slechts binnen een factor van circa 10 en op de locatie Heereweg Midland iets beter, namelijk binnen een factor van circa 3 à 5.

Als meetinstrument om de zuurstofconcentratie vast te stellen is de zuurstofsonde daarmee vooralsnog minder geschikt. Binnen de geformuleerde doelstelling is echter niet zozeer de zuurstofconcentratie als wel de indeling van de bodem in een aërobe en een anaërobe zone van belang. De reproduceerbaarheid van deze indeling blijkt veel groter. Voor de situatie waarbij de grens tussen beide zones bij 2 mg/l is gelegd, is dit weergegeven in figuur 11.

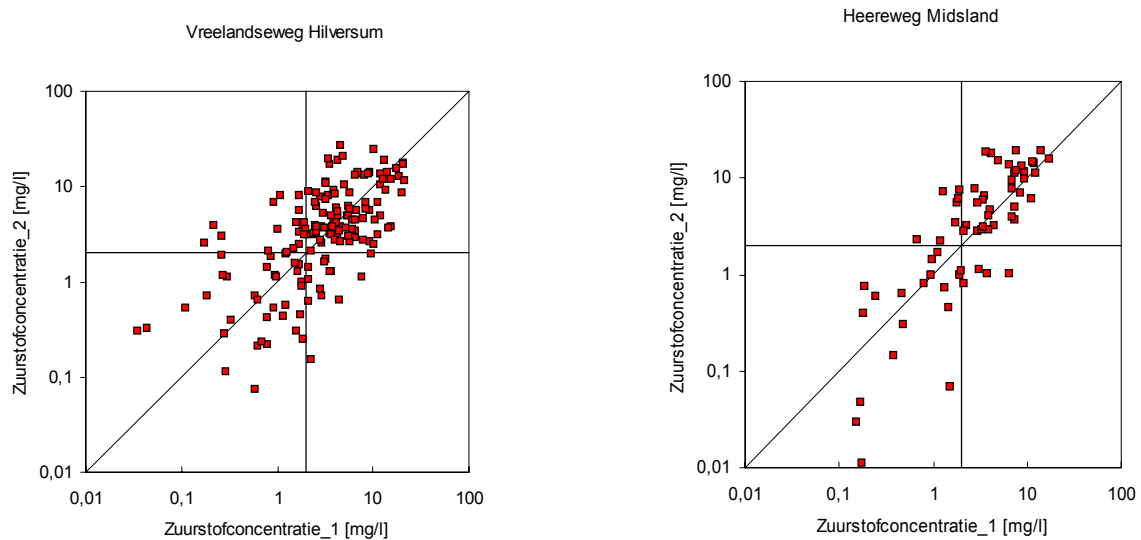


Fig. 11. Waarnemingen die bij de duplometingen in gelijke en in verschillende categorieën worden ingedeeld.

De waarnemingen in het tweede (linksboven) en vierde kwadrant (rechtsonder) van figuur 11 zijn de waarnemingen waarvan de interpretatie met betrekking tot de indeling in een aërobe en een anaërobe zone verschillend is. Op de locatie Vreelandseweg Hilversum betreft dit circa 18 % en op de locatie Heereweg Midland circa 15 % van de waarnemingen. De zuurstofmetingen voldoen derhalve met betrekking tot het onderscheid in aëroob en anaëroob aan de richtwaarde van 80 %.

Precisie

De precisie van de zuurstofmetingen kan niet worden vastgesteld, omdat de werkelijke concentratie aan zuurstof onbekend is.

5.2 Redoxsonde

Door de Rijksuniversiteit Groningen (RUG) is eveneens een elektrode ontwikkeld waarmee de redoxpotentiaal in het bodemvocht kan worden bepaald. Een elektrode bestaat uit drie sensoren die zijn ingebouwd in een sonde. De sensoren registreren de redoxpotentiaal in millivolt. Redoxmetingen zijn uitgevoerd op de locaties Vreelandseweg Hilversum en Heereweg Midland. De resultaten zijn opgenomen in bijlage C.

De metingen zijn uitgevoerd door tijdens de boring de sonde op een meer of minder groot aantal diepten enkele centimeters in de bodem van het boorgat te drukken en de geregistreeerde waarden van de afzonderlijke sensoren af te lezen. De meetreeksen geven geen aanleiding om de werking van de afzonderlijke sensoren in twijfel te trekken. Wel lijken de meetresultaten van één sensor structureel lager te zijn dan die van de andere twee sensoren. Vooralsnog zijn de resultaten van de drie sensoren gemiddeld.

Vanwege het structurele karakter heeft de afwijking van de ene sensor geen invloed op de reproduceerbaarheid van de metingen. Wel is de afwijking van invloed op de precisie en de relatie van de (gemiddelde) redoxpotentiaal met andere grootheden, zoals de zuurstofconcentratie.

Reproduceerbaarheid

De reproduceerbaarheid van de redoxmetingen is onderzocht door op de twee locaties door twee meetploegen op twee verschillende dagen volgens eenzelfde monsternemingsstrategie redoxmetingen te laten uitvoeren. Een vergelijking van de resultaten is weergegeven in figuur 12.

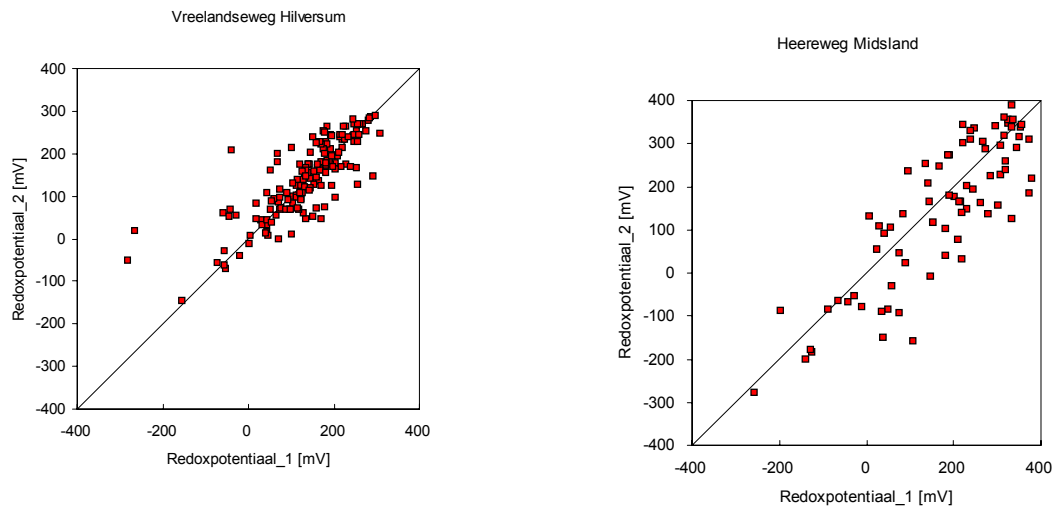


Fig. 12. Redoxpotentialen zoals gemeten met de redoxsonde in duplomonsters.

Uit figuur 12 volgt dat de redoxmetingen op de locatie Vreelandseweg Hilversum binnen een interval van circa 100 mV reproduceerbaar zijn. Op de locatie Heereweg Midsland is dit interval groter, circa 150 mV.

Precisie en relatie met de zuurstofconcentratie

De precisie van de redoxmetingen kan niet worden vastgesteld, omdat de werkelijke redoxpotentiaal onbekend is. Binnen de geformuleerde doelstelling is echter niet zozeer de redoxpotentiaal als zodanig van belang maar de indicatieve waarde ervan voor de aërobe en anaërobe zone. Het verband tussen de redoxpotentiaal en de zuurstofconcentratie is weergegeven in figuur 13.

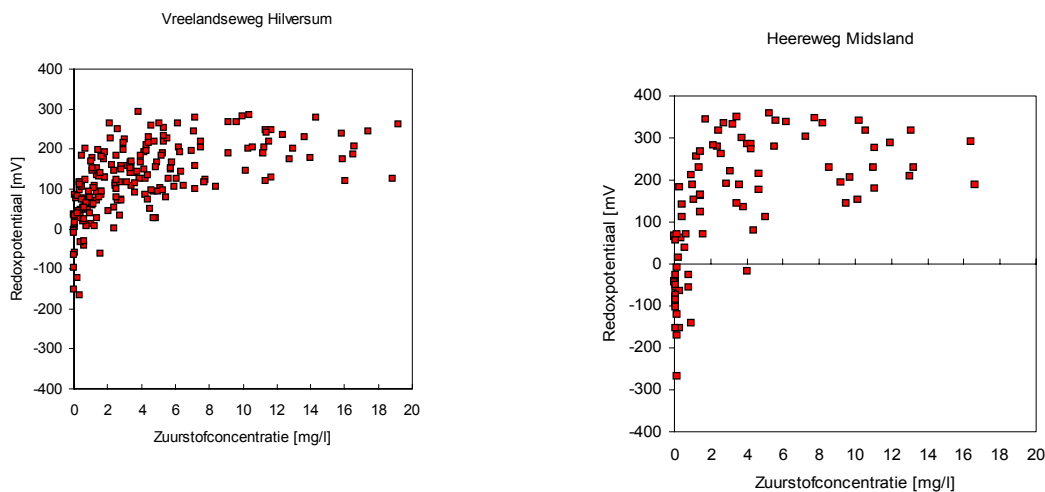


Fig. 13. Verband tussen de redoxpotentiaal en de zuurstofconcentratie zoals gemeten met de redox- en zuurstofsonde op twee locaties.

Uit figuur 13 blijkt dat er geen eenduidig verband bestaat tussen de redoxpotentiaal en de zuurstofconcentratie. Lage redoxpotentialen komen echter alleen voor bij zuurstofconcentraties die lager zijn dan circa 2 mg/l. Dit duidt erop dat in dit concentratietraject zuurstof niet bepalend is voor de milieuchemische omstandigheden (redoxtoestand). Een zuurstofconcentratie van 2 mg/l is daarmee geschikt als indicator voor de grens tussen de aërobe en anaërobe zone.

HOOFDSTUK 6

NAUWKEURIGHEID

Het onderzoek in de cluster "Zonering" heeft als doel de grens tussen de retentie- en de retardatiezone en de grens tussen de aërobe en de anaërobe zone voldoende nauwkeurig in beeld te brengen. 'Voldoende' is in het basisprojectplan gekwantificeerd als 80 %. Belangrijk is echter dat de nauwkeurigheid voldoende is om ongewenste onzekerheden in de dimensionering van een sanering (met perslucht) te vermijden. In hoeverre een dergelijke eis van nauwkeurigheid aansluit bij de eerder gestelde 80 % moet in de praktijk blijken. Mogelijk kan genoeg worden genomen met een lagere nauwkeurigheid, met name indien in het kader van in situ saneringen meer extensieve maatregelen worden overwogen.

De volumeschattingen van de retentiezone op basis van zonering met de olie-op-watertest en geurwaarnemingen en van de aërobe zone op basis van zonering met de zuurstofsonde zijn vermeld in tabel 7.

Tabel 7. Volumeschattingen van de onderscheiden zones op vier locaties bij twee afzonderlijke meetseries en de daaruit afgeleide nauwkeurigheid voor omvang en ligging.

	volume (m ³)			nauwkeurigheid (%)	
	serie A	serie B	overlap	omvang	ligging
Hoofdweg Damwoude					
olie-op-watertest	93	91	72	98	57
geurwaarnemingen	142	117	71	80	7
Gerwensweg Helmond					
olie-op-watertest	82	68	67	82	77
geurwaarnemingen	82	79	72	96	79
Vreelandseweg Hilversum					
olie-op-watertest	139	147	96	94	34
geurwaarnemingen	183	157	107	85	26
aërobe zone	563	590	499	95	73
Heereweg Midland					
olie-op-watertest	26	41	25	57	47
geurwaarnemingen	29	41	27	65	55
aërobe zone	335	326	320	97	94

Uit tabel 7 volgt dat de nauwkeurigheid, waarmee de omvang van de onderscheiden zones wordt bepaald, in de meeste gevallen groter dan 80 % bedraagt. Een kleinere nauwkeurigheid van de olie-op-watertest is aanwezig bij een retentiezone van kleine omvang (Midland).

Bij beschouwing van de behaalde nauwkeurigheden in tabel 7 moet in aanmerking worden genomen dat bij de zonering op basis van geurwaarnemingen de retentiezones op de locaties Helmond en Midland groter kunnen zijn, omdat de aanwezigheid van een (dieselolie)geur weliswaar op de aanwezigheid van pure olie duidt maar uit de afwezigheid van een geur niet kan worden geconcludeerd dat er geen pure olie aanwezig is. Op de locaties Helmond en Midland is op basis van geurwaarnemingen derhalve slechts het gebied in beeld gebracht waar 'ten minste' een retentiezone aanwezig is. De waarde van de zonering op basis van geurwaarnemingen is in dat opzicht kleiner dan van de zonering op basis van de olie-op-watertest.

De nauwkeurigheid, waarmee de ligging van de zones is vastgesteld, is steeds kleiner dan de nauwkeurigheid waarmee de omvang is vastgesteld. Dit is logisch omdat voor de nauwkeurigheid van de ligging slechts het volume meetelt dat in beide waarnemingsseries als de betreffende zone is gekwalificeerd.

De nauwkeurigheid waarmee de ligging van de aërobe zone kan worden vastgesteld, lijkt voorsnog voldoende. De nauwkeurigheid van de ligging van de retentiezone is echter, behalve op de locatie Helmond, problematisch, met name bij gebruik van geurwaarnemingen (Damwoude en Hilversum).

De vaststelling van de omvang en de ligging van de zones is gebaseerd op een celbenadering. Hierin wordt ieder meetpunt verondersteld het zwaartepunt te zijn van een bodemvolume dat overeenkomstige eigenschappen heeft als welke voor het meetpunt zijn vastgesteld. Deze 'cel' behoort dan volledig tot de zone waarvoor de meetwaarde indicatief is.

De celbenadering veronderstelt representativiteit van het monster voor de meetvariabele over een afstand tot halverwege het volgende meetpunt. Wanneer de monsters klein zijn in verhouding tot de afstand tussen de meetpunten is deze representativiteit alleen aannemelijk bij een grote ruimtelijke afhankelijkheid.

Ruimtelijke afhankelijkheid ontstaat als gevolg van het verontreinigingsproces of als gevolg van secundaire processen nadat de verontreiniging is ontstaan.

Ruimtelijke afhankelijkheid als gevolg van het verontreinigingsproces bestaat voor olie bijvoorbeeld langs leidingtracés. Daarnaast bestaat ruimtelijke afhankelijkheid doordat olie zich door de bodem heeft verplaatst. In goed doorlatende bodemlagen is de afstand waarover deze ruimtelijke afhankelijkheid optreedt dan ook groter dan in slecht doorlatende gronden of in lagen waarin barrières voorkomen. Anderzijds kan de ruimtelijke afhankelijkheid in slecht doorlatende gronden groot zijn langs rioleringen, funderingen en andere aangebrachte structuren.

De ruimtelijke afhankelijkheid van de zuurstofconcentratie hangt samen met de aanwezigheid van oxideerbaar materiaal en wordt bij olieverontreinigingen voorsnog verondersteld van een overeenkomstige orde van grootte te zijn als de ruimtelijke afhankelijkheid in de olie.

In verticale richting vormen de overgangen in grondsoort veelal belangrijke barrières. De ruimtelijke afhankelijkheid in verticale richting is daardoor doorgaans kleiner dan in horizontale richting en kan bij laagovergangen zelfs geheel ontbreken. De beperkte ruimtelijke afhankelijkheid in verticale richting pleit ervoor ten minste in iedere bodemlaag en in ieder dieptetraject van 25 cm een waarneming te verrichten. In horizontale richting moet de meetdichtheid samenhangen met een inschatting van de verspreidingsmogelijkheden. In zandgrond kan de meetdichtheid dus kleiner zijn dan in klei- of veengronden.

Uit de definitie volgt dat de nauwkeurigheid kleiner is, naarmate bij eenzelfde meetdichtheid (celgrootte) de omvang van de betreffende zone kleiner is. Dit betekent dat voor het vaststellen van de omvang en de ligging van kleine zones voor eenzelfde nauwkeurigheid een fijner meetraster nodig is. In de praktijk kan hieraan het beste invulling worden gegeven door eerst in grof raster de verwachte omvang van de zone in beeld te brengen en de randzone daarna via een fijner raster te detailleren.

BODEMKARAKTERISERING VANUIT PERSLUCHTPERSPECTIEF**7.1 Intreedruk en doorlatendheid**

De intreedruk van een laag kan worden afgeleid uit de vocht karakteristiek ($P_c S_w$ -curve) die het verband aangeeft tussen de capillaire druk in de poriën (P_c) en de waterverzadiging (S_w). De vocht karakteristiek wordt bepaald door een grondmonster te verzadigen met water, dit water vervolgens door het aanbrengen van verschillende drukhoogten in stappen te onttrekken en de onttrokken hoeveelheid te meten [Locher en De Bakker, 1991]. De verdringing van het water kan worden uitgevoerd met zowel olie, lucht¹ als met een andere NAPL. De vocht karakteristiek van een olie-watersysteem verschilt echter wel van die van een lucht-watersysteem of die van een 'andere NAPL'-watersysteem.

De meetprocedure voor het vaststellen van de 'normale' vocht karakteristiek voor het lucht-water-systeem sluit naadloos aan bij de verdringing van water door lucht, zoals dat bij persluchtinjectie in de bodem plaatsvindt. Mede omdat van vrijwel ieder bodemtype vocht karakteristieken bekend zijn, zijn deze geschikt om inzicht te verkrijgen in de (intree)druk die nodig is om lucht in een bepaalde bodemlaag te laten binnendringen.

De doorlatendheid van bodemlagen kan op verschillende manieren worden bepaald, zowel in het laboratorium als in het veld. De meest directe methode is de meting in ongestoorde grondmonsters [Ridder, 1977]. Het monster wordt in een cilindervormige buis gebracht met aan de onderzijde een poreus plaatje, waarna een constant drukverschil wordt aangebracht en de hoeveelheid water, die door het poreuze plaatje stroomt, wordt gemeten. De doorlatendheid kan vervolgens met de Wet van Darcy worden berekend.

Het meten van de intreedruk en de doorlatendheid volgens beide, directe methoden kent een aantal nadelen. De belangrijkste is dat monsterneming een verstoring van het bodemprofiel veroorzaakt en daarmee voorkeursstroombanen voor perslucht in de bodem introduceert. Daarnaast speelt dat voor de metingen een monstervolume nodig is van enkele honderden cm^3 en de monsters over een laag met een dikte van ten minste 10 à 20 cm moeten worden genomen. De metingen middelen daardoor uit over een schaal die groter is dan de schaal die voor imbibitie- en drainageprocessen relevant is. Er is tevens een financieel nadeel. Het grote aantal monsters dat per locatie onderzocht zou moeten worden, is wellicht onacceptabel in de fase waarin het project zich bevindt.

Het karakteriseren van een bodemprofiel door een indeling in lagen met een verschillende intreedruk en doorlatendheid moet daarom bij voorkeur gebaseerd zijn op een in situ meetmethode, die geen verstoring van het bodemprofiel veroorzaakt maar wel in staat is laagovergangen op de schaal van enkele centimeters vast te stellen en die tegelijkertijd betaalbaar is. De kleinste meet-schaal waarop in de gangbare praktijk gegevens inzake de bodemopbouw verkregen kunnen worden, wordt bereikt met sonderingen. Daarbij kunnen in de verticaal per centimeter meetwaarden beschikbaar komen. Andere methoden leveren slechts meetwaarden op (veel) grotere schaal die bovendien onder normale praktijkomstandigheden niet continu maar slechts hier en daar beschikbaar komen.

¹ De vocht karakteristiek voor het lucht-watersysteem is de zogenaamde $P_c S_w$ -curve of pF-curve.

Voorbijgaand aan eventuele verschillen in betrouwbaarheid en nauwkeurigheid zijn sondeergegevens, vanwege de meetschaal en de continuïteit van de metingen, daarom zeer geschikt om de bodemopbouw te karakteriseren naar kenmerken die voor imbibitie- en drainageprocessen van belang zijn. Voor de verwerking van sondeergegevens is trajectdifferentiatie ontwikkeld. Hierop wordt nader ingegaan in hoofdstuk 8

7.2 Relaties met de grondsoort

De bodemkenmerken, die in eerste instantie doorslaggevend zijn in het beschrijven van de stroming van olie en lucht in de bodem, zijn de (verticale) intreedruk van de laag waarheen de olie of de lucht zich wil verplaatsen en de (horizontale) doorlatendheid van de laag waarin de olie of de lucht zich op dat moment bevindt. Er geldt:

$$P_c = \frac{\gamma}{2r}$$

waarin:

- P_c is de verticale intreedruk (N/m^2);
- γ is de oppervlaktespanning (N/m);
- r is de poriestraal (m).

$$k = \frac{r^2}{8\mu}$$

waarin:

- k is de horizontale doorlatendheid (m/dag);
- μ is de viscositeit (Ns/m^2).

Uit bovenstaande vergelijkingen volgt dat beide bodemkenmerken samenhangen met de poriestraal. De verdeling van poriestralen hangt op zijn beurt samen met de grondsoort, zodat aan de hand van de grondsoort inzicht in het gedrag van olie en lucht in de bodem kan worden verkregen. Uit bovenstaande vergelijkingen volgt óók dat lagen met een grote intreedruk een lage doorlatendheid hebben en andersom.

Intreedruk

De vocht karakteristiek heeft een geleidelijk verloop en er is niet een eenduidige druk waaronder geen en waarboven alle poriën luchtgevuld zijn. Clayton [1996] stelt dat stroming van lucht gaat optreden vanaf luchtverzadigingen van 2 % in leemarm grof zand tot 16 % in leemhoudend zand. In leem en klei liggen deze minimaal benodigde verzadigingen mogelijk nog hoger. Als maatgevende karakteristiek voor de intreedruk kunnen daarom waarden worden gekozen voor de druk die nodig is om 2 tot 30 % van de poriën luchtgevuld te krijgen (P_{c2} tot P_{c30}). De gedachte achter een minimaal benodigd luchtgevuld porievolume is dat alleen bij een minimale luchtverzadiging de kans voldoende groot is dat de luchtgevulde poriën een aaneengesloten luchtbaan vormen waardoor de lucht door de laag kan ontsnappen.

De Toelichting op de Bodemkaart van Nederland (1 : 50.000) geeft voor enkele kaartbladen ook de gegevens van de vocht karakteristieken van een aantal beschreven bodemprofielen. De gegevens van de kaartbladen 6 (Leeuwarden), 22 (Coevorden), 28 (Enschede), 30 (Aalten) en 41 (Den Haag) zijn geïnventariseerd en opgenomen in bijlage E.

Op basis van de geïnventariseerde gegevens is voor iedere grondsoort een gemiddelde vocht karakteristiek opgesteld, waarna de P_c -waarden door interpolatie zijn bepaald. De geïnterpoleerde waarden zijn weergegeven in tabel 8. Daarnaast zijn P_c -waarden berekend uit de standaardvocht karakteristieken van een aantal gronden, zoals die zijn gegeven door Locher en De Bakker [1991]. Ook deze zijn vermeld in tabel 8.

Tabel 8. Intreedruk (mbar).

code	grondsoort	P_c -waarde	geïnventariseerde waarden		richtwaarde	
			Bodemkaart	Locher en De Bakker	minimum	maximum
1	grind met grof zand	P_{c2}	-	-	1	10
2	grind met fijn zand	P_{c2}	-	-	1	10
3	grindhoudend, grof zand	P_{c5}	< 5	-	5	20
4	grindhoudend, fijn zand	P_{c5}	< 5	-	5	20
5	grof zand	P_{c5}	10	< 5	5	20
6	fijn zand	P_{c5}	12	< 4	5	30
7	zwak lemig grof zand	P_{c10}	14	-	10	40
8	zwak lemig fijn zand	P_{c10}	18	33	15	60
9	sterk lemig zand	P_{c15}	36	40	30	50
10	zandige leem	P_{c15}	530	86	100	500
11	lichte zavel	P_{c30}	151	182	150	200
12	zware zavel	P_{c30}	673	347	300	700
13	venig zand	P_{c15}	168	-	150	200
14	zandig veen	P_{c15}	40	83	40	100
15	leem	P_{c30}	-	-	600	1000
16	lichte klei	P_{c30}	2249	1201	1000	3000
17	zware klei	P_{c30}	5356	5764	4000	6000
18	venige klei	P_{c30}	924	-	800	1200
19	kleilig veen	P_{c30}	4669	-	3000	5000
20	veen	P_{c30}	-	493	400	800

Vergelijking van de P_c -waarden geeft aan dat de schattingen van de intreedruk voor de onderscheiden grondsoorten goed overeenkomen. Op basis van de waarden is een richtwaardenbereik gegeven waarbinnen de intreedruk van de onderscheiden grondsoorten onder normale omstandigheden naar verwachting varieert. Van deze richtwaarden wordt onder andere gebruik gemaakt in de ontwerp- en dimensioneringshandvatten voor persluchtinjectie. Deze zijn beschreven in het deelrapport inzake de cluster "Perslucht".

Doorlatendheid

De horizontale doorlatendheid van bodemlagen met ten hoogste 12 % lutum kan volgens de Cultuurtechnische vereniging [1988] worden geschat uit de mediane korreldiameter van de zandfractie en de lutumfractie. Bij benadering geldt:

$$k = \left(\frac{M_{50}}{60}\right)^2 \cdot 10^{-0,2 \cdot L}$$

waarin:

- k is de horizontale doorlatendheid (m/dag);
- M_{50} is de mediane korreldiameter van de zandfractie (μm);
- L is het lutumgehalte (%).

Voor dezelfde grondmonsters als waarvan de gegevens van de vocht karakteristieken zijn geïnventariseerd, zijn ook de gegevens van de korrelgrootteverdelingen overgenomen uit de Toelichting op de Bodemkaart van Nederland (1 : 50.000). Ook deze gegevens zijn opgenomen in bij-

lage E. Voorzover het lutumgehalte van deze grondmonsters niet groter was dan 12 %, zijn de horizontale doorlatendheden van de betreffende grondsoorten vervolgens met behulp van de voorgaande formule berekend en zijn de gemiddelde waarden daarvan weergegeven in tabel 9 (Bodemkaart). Daarnaast zijn in tabel 9 de doorlatendheden opgenomen, zoals die door Rijtema [Cultuurtechnische vereniging, 1988] als standaardwaarden voor een aantal karakteristieke grondsoorten zijn gegeven.

Vergelijking van beide waarden geeft aan dat de doorlatendheden soms sterk verschillen. Onduidelijk is in hoeverre dit te maken heeft met de (fysisch aanwezige) variatie in doorlatendheid binnen de betreffende grondsoorten dan wel met onvolkomenheden van de schattingen. Vooral nog is, evenals voor de intreedruk, een richtwaardenbereik gegeven waarbinnen de doorlatendheid onder 'normale' omstandigheden naar verwachting varieert. Van deze richtwaarden wordt onder andere gebruik gemaakt in de ontwerp- en dimensioneringshandvatten voor persluchtinjectie. Dit is beschreven in het deelrapport inzake de cluster "Perslucht".

Tabel 9. Horizontale doorlatendheid (m/dag).

code	grondsoort	geïnterpreteerde waarden		richtwaarde	
		Bodemkaart	Rijtema	minimum	maximum
1	grind met grof zand	46	-	10	50
2	grind met fijn zand	-	-	10	50
3	grindhoudend, grof zand	9,6	-	5	20
4	grindhoudend, fijn zand	5,2	-	5	20
5	grof zand	16	11	5	20
6	fijn zand	2,0	1,1	1	5
7	zwak lemig grof zand	1,3	0,23	0,5	2,0
8	zwak lemig fijn zand	1,1	0,70	0,5	2,0
9	sterk lemig zand	0,74	0,01	0,1	0,5
10	zandige leem	-	0,143	0,05	0,2
11	lichte zavel	0,031	0,235	0,05	0,2
12	zware zavel	-	0,015	0,01	0,05
13	venig zand	0,67	-	0,5	1,0
14	zandig veen	0,30	-	0,1	0,5
15	leem	-	0,042	0,01	0,05
16	lichte klei	-	0,035	0,005	0,02
17	zware klei	-	0,0022	0,001	0,005
18	venige klei	-	-	0,005	0,02
19	kleilig veen	-	-	0,01	0,05
20	veen	-	0,053	0,02	0,1

7.3 Trajectdifferentiatie

Uit de voorgaande paragrafen (zie 7.1 en 7.2) is duidelijk geworden dat de voor persluchtinjectie relevante bodemkenmerken, intreedruk en doorlatendheid, in de praktijk het beste kunnen worden ingeschat uit informatie over de bodemopbouw en dat deze informatie op een relatief gedetailleerd schaalniveau aanwezig moet zijn. Dit vereist bodemkarteringstechnieken die op een klein schaalniveau meten en ten behoeve van de noodzakelijke nauwkeurigheid ter compensatie daarvan, gemakkelijk en financieel haalbaar op een groot aantal plekken in de bodem kunnen worden ingezet.

Daarnaast is uit de hoofdstukken 4, 5 en 6 duidelijk geworden dat de onderzochte zonerings-technieken de nodige nadelen kennen.

De olie-op-watertest is weliswaar robuust, in de praktijk eenvoudig toepasbaar en goed reproduceerbaar maar levert toch slechts een matige nauwkeurigheid op, met name ten aanzien van de ligging.

Geurwaarnemingen zijn arbitrair, hebben geen eenduidige relatie met de aanwezigheid van olie als puur product en hebben, mogelijk mede daardoor, eveneens geen grote nauwkeurigheid ten aanzien van met name de ligging. Daarnaast is zonering door middel van geurwaarnemingen ongewenst vanuit het oogpunt van de arbeidshygiëne.

De zuurstofsonde levert - op de onderzochte locaties althans - weliswaar goede nauwkeurigheiden ten aanzien van zowel de omvang als de ligging, maar is bewerkelijk, gevoelig voor storingen en derhalve in het veld van beperkte waarde.

De nadelen van de beschouwde zoneringstechnieken hangen samen met het grillige verloop dat de buitencontour van een zone doorgaans kent, bijvoorbeeld doordat de ene zone vingervormig uitstulpt in een andere zone of doordat zich binnen een zone gedeelten bevinden die feitelijk tot een andere zone behoren. Duidelijk is dit het geval in de smeerzone, zoals die in 3.1 is beschreven. De grens tussen zones is derhalve veelal diffuus van aard en is daarom geschikt om in stochastische termen te worden beschreven.

De mate van 'diffuus zijn' van een zone hangt af van de schaal waarop zich heterogeniteiten in de zone voordoen. Deze heterogeniteiten hangen naar verwachting samen met de bodemstructuur.

Vanwege de beperkingen van de onderzochte zoneringsmethoden en de aanvullende wensen ten aanzien van het inzichtelijk maken van de heterogeniteit is trajectdifferentiatie ontwikkeld als methode om een beeld van de bodemopbouw te verkrijgen op het schaalniveau zoals dat relevant wordt verondersteld voor aspecten die door processen van imbibitie en drainage worden bepaald. De methode van trajectdifferentiatie wordt in het volgende hoofdstuk beschreven.

TRAJECTDIFFERENTIATIE

8.1 Algemene karakteristiek

Het doel van trajectdifferentiatie is een karakterisering van de bodem mogelijk te maken waarmee in een vroeg stadium van onderzoek kan worden aangegeven welke saneringsmethoden voor toepassing interessant kunnen zijn. Trajectdifferentiatie moet daarvoor:

1. breed toepasbaar zijn;
2. betaalbaar zijn;
3. voldoende detail leveren;
4. reproduceerbaar en controleerbaar zijn.

Brede toepasbaarheid houdt in dat trajectdifferentiatie toepasbaar moet zijn op bodems van uiteenlopende aard. Daarnaast moet de methode liefst door veel gebruikers kunnen worden gebruikt en moet de toepassing niet afhankelijk zijn van enkele specialisten. Samenhangend met de bovengenoemde, brede toepasbaarheid in technische zin moet trajectdifferentiatie betaalbaar zijn om ook in financiële zin toepasbaar te zijn. Dit stelt onder andere eisen aan de wijze waarop gegevens over de bodem worden verkregen.

Trajectdifferentiatie moet voldoende detail leveren om een goed oordeel te kunnen vormen over de processen die bij de sanering van een bodemverontreiniging van belang zijn. Aan de andere kant is het niet doelmatig meer detail aan te brengen dan nodig is. Het is daarom een voordeel indien de mate van detail, die bij trajectdifferentiatie over de bodemopbouw wordt verkregen, aanpasbaar is aan de situatie.

Tenslotte moet trajectdifferentiatie reproduceerbaar en controleerbaar zijn. Het is ongewenst als verschillende gebruikers op grond van dezelfde gegevens tot verschillende resultaten komen. De methode dient daarom bij voorkeur gebaseerd te zijn op robuuste, eenvoudige, liefst getalsmatige principes. Indien het daarbij noodzakelijk blijkt arbitraire keuzes te maken, moeten deze op z'n minst controleerbaar zijn en derhalve ter discussie gesteld kunnen worden.

Trajectdifferentiatie is een statistische methode om een bodemprofiel op basis van sondeergegevens in te delen in lagen. De karakterisering van deze lagen ten behoeve van het stromingsgedrag van olie en lucht komt tot stand door deze lagen bodemkundig te karakteriseren en deze bodemkundige karakterisering te koppelen aan bekende gegevens inzake intreedruk en doorlatendheid (zie hoofdstuk 7). Deze koppeling geeft inzicht in de bodemlagen waarin ophoping van olie is te verwachten en in de mate waarin deze lagen met lucht kunnen worden doorstroomd. Trajectdifferentiatie geeft voor de bodem de potentiële toepassingsmogelijkheden aan van saneringsmethoden met perslucht. In combinatie met de oliekaracterisering levert trajectdifferentiatie daarmee de benodigde informatie voor het ontwerpen, dimensioneren en monitoren van een sanering van een locatie die is verontreinigd met olie.

De trajectdifferentiatie valt uiteen in twee werkstappen. In de eerste werkstap worden sondeerprofielen uitgewerkt in trajecten die de belangrijkste laagovergangen in de verticaal presenteren. In de tweede werkstap worden trajecten van verschillende profielen uitgewerkt tot horizontale gelaagdheden.

Hoewel de trajectdifferentiatie, zoals die in dit rapport is beschreven, primair is ontwikkeld om een bodemprofiel naar intreedruk en doorlatendheid te kunnen indelen, zijn de meeste, voornamelijk bodemkundige en wiskundige principes procesonafhankelijk waardoor trajectdifferentiatie meer algemeen toepasbaar is.

Behalve intreedruk en doorlatendheid kunnen dus ook andere, met conusweerstand en wrijvingsgetal samenhangende, of via de grondsoort daaruit af te leiden grootheden in beeld worden gebracht. Daarnaast is de uitwerking, zoals die in dit rapport is ontwikkeld voor het inschatten van het gedrag van olie en lucht, ook geschikt om een oordeel te geven over het gedrag van andere NAPL.

8.2 Verticale indeling

8.2.1 Statistische keuzes

In statistisch opzicht is de verwerking van de sondeergegevens ten behoeve van de verticale indeling in trajecten een manier van 'zonation' [Davis, 1986]. 'Zonation' is het verdelen van een reeks in relatief homogene segmenten, die ieder voor zich verschillen van naburige segmenten. Er zijn twee principieel verschillende benaderingen van 'zonation':

- 'local boundary hunting';
- 'global zonation'.

'Local boundary hunting' zoekt naar plotselinge overgangen in gemiddelde waarden of, hetgeen op hetzelfde neerkomt, naar de steilste gradiënten in een reeks. Een nadeel van local boundary hunting is dat een buitensporig groot aantal segmenten kan worden gevonden, waardoor de praktische toepasbaarheid van de methode beperkt kan blijken.

'Global zonation' verdeelt een reeks in een tevoren gekozen aantal segmenten met een zo groot mogelijke intrinsieke homogeniteit en met zo groot mogelijke verschillen tussen de segmenten. Een nadeel van global zonation is dat het aantal 'lagen' tevoren wordt gekozen en dat de methode dus niets zegt over de gelaagdheid.

Local boundary hunting

Webster [1973] ontwikkelde een 'split-moving window methode' voor het onderscheiden van overgangen in bodemzones langs een raai. Een reeks wordt beoordeeld door een kort interval over de reeks te 'schuiven'. Het verschuivende interval wordt een window genoemd en is verdeeld in twee delen (split-window); een segment van punt $i-h$ in de reeks tot punt i en een segment van punt i tot punt $i+h$. Het verschil tussen de segmenten binnen de beide helften van het window wordt uitgedrukt in een 'generalized difference'. Dit is de wortel uit de verhouding tussen het gekwadrateerde verschil van de gemiddelde waarden van beide segmenten en de gecombineerde variantie binnen de beide segmenten:

$$D = \sqrt{\frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2)^2}{s_1^2 + s_2^2}}$$

waarin:

- D is de 'generalized difference';
- \bar{X}_i is het gemiddelde van de waarden in segment i ;
- s_i^2 is de variantie van de waarden in segment i .

Een groot window middelt uit over kleine intervallen maar kan korte segmenten 'missen'. Het onderdrukt echter de ruis in een sterk variabele reeks. Een klein window daarentegen is veel ge-

voeliger en zal kortere segmenten identificeren maar kan daardoor een slecht interpreteerbare indeling opleveren.

Global zonation

Gill [1970] paste global zonation toe door middel van een voortschrijdende variantie-analyse. Behalve voor het eerste en laatste punt wordt voor ieder punt in een reeks de verhouding berekend tussen de som van de kwadraten binnen de beide segmenten waarvan het punt de begrenzing vormt (SS_w) en de som van de kwadraten tussen deze segmenten (SS_b). Het punt waarvoor deze verhouding (R) een maximale waarde bereikt, geeft de eerste en meest significante zone-overgang aan:

$$R = \frac{SS_b - SS_w}{SS_b}$$

waarin:

- R is de toetsingswaarde;
- SS_b is de som van de kwadraten tussen de beide segmenten;
- SS_w is de som van de kwadraten binnen de beide segmenten.

Vervolgens worden de beide, meest significant verschillende segmenten elk op dezelfde wijze verder verdeeld.

Hawkins en Merriam [1973; 1974] hebben Gill's methode ook toegepast. Zij kiezen daarbij echter niet steeds uitsluitend de zone-overgang met de hoogste R , op basis waarvan vervolgens de resterende segmenten verder worden verdeeld, maar beschouwen steeds alle mogelijke zone-overgangen. Hiermee wordt recht gedaan aan het principe dat na het invoeren van een nieuwe zone-overgang een eerdere zone-overgang niet meer automatisch het meest onderscheidend hoeft te zijn.

In tegenstelling tot local boundary hunting hebben de segmenten bij global zonation geen vaste grootte en kunnen de beide segmenten, die met elkaar worden vergeleken, ook verschillend van grootte zijn.

Afweging

De vergelijking tussen beide methoden van zonation is samengevat in tabel 10. Bij local boundary hunting wordt het aantal lagen volledig bepaald door de lokale heterogeniteit in de reeks. Het aantal lagen kan daardoor soms zeer groot zijn. In de beoordeling kan dat weliswaar lastig zijn, maar het geeft de werkelijke situatie wel goed weer. In vergelijking met global zonation is local boundary hunting daarom op dit punt objectiever.

Bij global zonation daarentegen hoeft geen keuze te worden gemaakt inzake de grootte van het window waarvoor de verschillen worden beoordeeld. Alle mogelijke schalen worden steeds in beschouwing genomen. De noodzakelijke keuze van de grootte van een window bij local boundary hunting hoeft echter niet altijd een nadeel te zijn. Door een weloverwogen keuze op basis van proceskennis kan juist doelbewust naar zone-overgangen op bepaalde, relevante schaalniveaus worden gezocht, terwijl aan minder relevante schaalniveaus geen aandacht hoeft te worden geschonken.

Bij local boundary hunting worden alleen verschillen binnen een beperkt deel van de reeks beschouwd. Dit heeft als voordeel dat kleine heterogeniteiten in een ogenschijnlijk homogene laag

toch worden opgemerkt, terwijl deze bij global zonation kunnen wegvallen tegen de veelal grotere maar mogelijk minder relevante verschillen in meer heterogene lagen.

Het meer recht-toe-recht-aan karakter van local boundary hunting vergt minder reken capaciteit dan global zonation.

Tabel 10. Vergelijking tussen zonering volgens local boundary hunting en global zonation.

local boundary hunting	global zonation
1. geen vastgesteld aantal lagen	1. gekozen, vast aantal lagen
2. gekozen, vaste raamgrootte	2. geen keuze raamgrootte nodig
3. kijkt naar lokale verschillen	3. kijkt naar globale verschillen
4. rekenkundig eenvoudig	4. rekenkundig complex

De voordelen van het eerste en derde punt zijn doorslaggevend om ten aanzien van het gedrag van olie en lucht te kiezen voor een trajectdifferentiatie die gebaseerd is op local boundary hunting. Het nadeel van punt 2 kan teniet worden gedaan door het bereik van relevante window-breedten nader af te perken tot die laagdikten die voor het gedrag van olie en lucht relevant schijnen en binnen dit bereik meer dan één grootte van het window te beschouwen. Tenslotte is ook de geringere benodigde reken capaciteit een argument om voor local boundary hunting te kiezen.

Logaritmische transformatie

De generalized difference geeft de grootte aan van het verschil tussen twee split-windows en heeft voor iedere diepte van het bodemprofiel een waarde. Veelal is de waarde echter slechts het gevolg van 'random', niet-structurele verschillen tussen de beschouwde split-windows. Deze verschillen komen voort uit de fysische realiteit dat een bodemlaag nooit volledig homogeen is, maar op microschaal is opgebouwd uit verschillende materialen (zand, klei, organisch materiaal, kalk) die op verschillende wijze structuur vertonen (poriestructuur, aggregaten). Daar tegenover staan structurele verschillen doordat meer zandig materiaal een andere bodemstructuur heeft dan meer kleiig materiaal of materiaal dat rijk is aan kalk of organische stof. Voorzover deze structurele verschillen zich voordoen op een schaalniveau dat relevant is voor de stroming van olie of lucht, gelden de bijbehorende diepten als scheiding tussen verschillende bodemlagen.

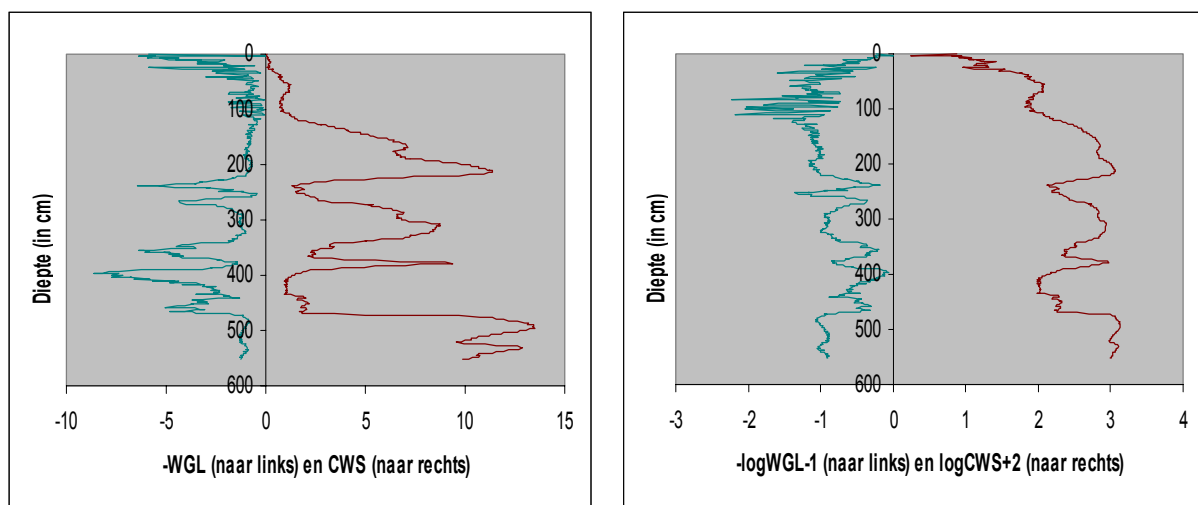


Fig. 14. Verloop van conusweerstand (CWS) en wrijvingsgetal (WGL) met de diepte vóór en ná logaritmische transformatie (Zutphensestraat Brummen; sondering 3).

Het onderscheiden van structurele en niet-structurele verschillen kan plaatsvinden door de significantie van de berekende generalized difference te toetsen. Vanwege de overeenkomst in berekening van de generalized difference met de toetsingsgrootte van de Student's t-toets wordt deze laatste hiervoor gebruikt.

Voorwaarden voor het toepassen van de Student's t-toets zijn dat de meetwaarden binnen de beide helften van het window bij benadering normaal verdeeld zijn en overeenkomstige variaties bezitten. Aan deze voorwaarden wordt slechts bij benadering voldaan. Verbetering is in het algemeen mogelijk indien de sondeergegevens logaritmisch worden getransformeerd. Dit is weergegeven in figuur 14. Figuur 14 geeft aan dat de variaties in conusweerstand en wrijvingsgetal na logaritmische transformatie meer gelijkmatig verdeeld zijn over het bodemprofiel.

8.2.2 Bodemkundige keuzes

Principal component analyse

De indeling van het sondeerprofiel in trajecten is gebaseerd op bodemkundige verschillen. De bodemkundige karakterisering gebeurt aan de hand van een gelijktijdige beoordeling van zowel de conusweerstand als het wrijvingsgetal. Local boundary hunting is echter slechts in staat verschillen binnen een enkele getallenreeks aan te geven. Om conusweerstand en wrijvingsgetal bij trajectdifferentiatie toch gelijktijdig in beschouwing te kunnen nemen, wordt op deze beide variabelen eerst een principal component analyse (PCA) uitgevoerd.

Principal component analyse is toepasbaar op gegevensbestanden waarbij per meetpunt (in dit geval per diepte) twee of meer meetwaarden (in dit geval conusweerstand en wrijvingsgetal) beschikbaar zijn. De meetwaarden kunnen worden weergegeven in een assenstelsel dat wordt opgespannen door de beide gemeten variabelen. Dit is weergegeven in figuur 15a.

Bij principal component analyse worden twee nieuwe, onderling loodrechte assen bepaald die eveneens de ruimte opspannen waarin zich de meetpunten bevinden. De eerste as is nu echter zo gekozen dat de projecties van de meetpunten op deze as de maximale verschillen weergeven tussen de meetpunten. De projecties van de meetpunten op de tweede as, die daar loodrecht opstaat, presenteren de resterende verschillen. Dit is weergegeven in figuur 15b.

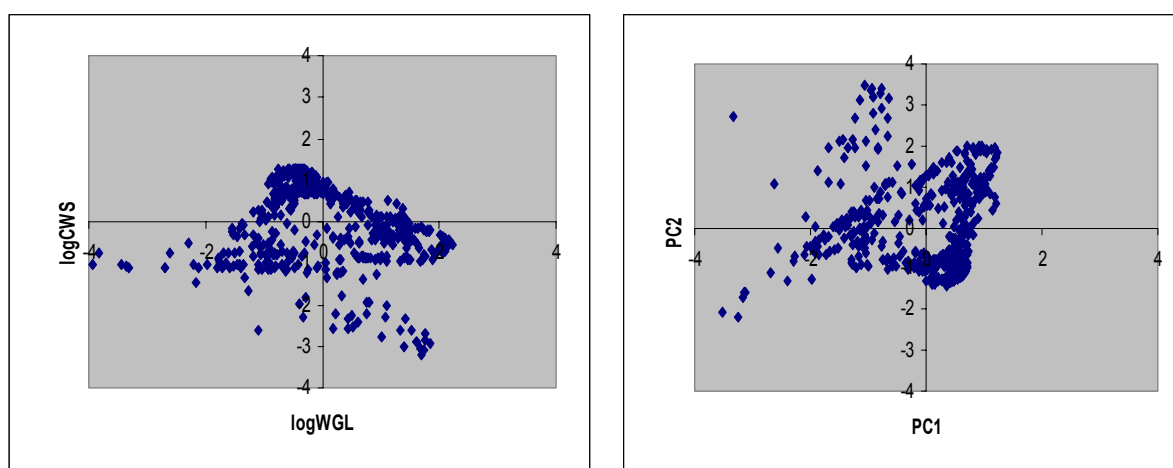


Fig. 15. Presentatie van de meetpunten naar conusweerstand en wrijvingsgetal (logCWS en logWGL) en naar eerste en tweede principal component (PC1 en PC2).

Het maximaliseren van de verschillen in de eerste principal component uit zich in figuur 15 in de meer uitgerekte vorm van de puntenwolk langs de (horizontale) hoofdas in figuur 15a ten op-

zichte van figuur 15b: de projecties van de punten op deze as liggen in figuur 15b verder uit elkaar dan in figuur 15a en representeren een grotere variantie. Complementair daaraan liggen de projecties van de punten op de verticale as in figuur 15b gemiddeld dichter bij elkaar dan in figuur 15a en representeren deze een kleinere variantie.

De projecties van de meetpunten op de beide assen worden de principal components genoemd. Zij vormen twee nieuwe meetreeksen die in de plaats kunnen worden gesteld van de oorspronkelijke meetreeksen van conusweerstand en wrijvingsgetal. De projecties op de eerste (horizontale) principal component-as zijn de eerste principal components en geven de oorspronkelijke verschillen in conusweerstand en wrijvingsgetal maximaal weer. Dit is zichtbaar in het grotere bereik van de eerste principal components ten opzichte van zowel de tweede principal components in figuur 15b als de conusweerstand en het wrijvingsgetal in figuur 15a. Toepassing van local boundary hunting op de eerste principal component is daarmee de meest efficiënte methode om conusweerstand en wrijvingsgetal gelijktijdig in beschouwing te nemen.

In figuur 16 zijn de resultaten gepresenteerd van een local boundary hunting op zowel de conusweerstand, het wrijvingsgetal als op de eerste principal component. Bij de local boundary hunting op de conusweerstand wordt geen rekening gehouden met verschillen in het wrijvingsgetal, zoals bij de local boundary hunting op het wrijvingsgetal geen rekening wordt gehouden met verschillen in de conusweerstand. Bij de local boundary hunting op de eerste principal component wordt geen rekening gehouden met de verschillen in de tweede principal component. Deze verschillen zijn echter geminimaliseerd, zodat de verwaarlozing van de verschillen bij local boundary hunting op de (eerste) principal component kleiner is dan bij de beide overige opties.

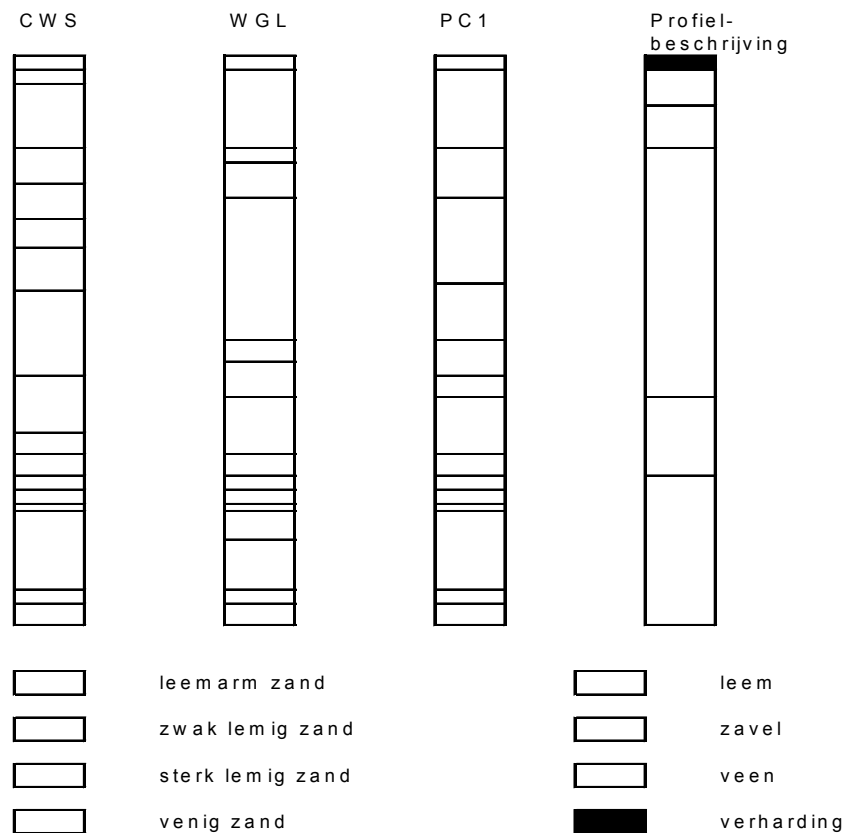


Fig. 16. De indeling van een bodemprofiel door toepassing van trajectdifferentiatie op de conusweerstand, het wrijvingsgetal en op de (eerste) principal component van deze beide en aan de hand van de profielbeschrijving.

Uit figuur 16 blijkt dat local boundary hunting op basis van conusweerstand én wrijvingsgetal geen duidelijk afwijkend beeld levert van de trajectdifferentiatie op basis van de eerste principal component. Omdat deze laatste dus de meeste garantie biedt dat zo min mogelijk informatie verloren gaat, terwijl toch slechts een enkele meetreeks in beschouwing hoeft te worden genomen, is de trajectdifferentiatie, uitsluitend vanuit praktisch oogpunt, gebaseerd op local boundary hunting op de eerste principal component. De principal component analyse is echter op zich geen noodzakelijk onderdeel om 'trajectdifferentiatie' uit te voeren. Iedere andere methode, om verantwoord van twee naar één meetreeks te gaan, volstaat.

Significantie van laagovergangen

De significantie van de laagovergangen kan worden ingesteld door de toetsingswaarde van de Student's t-toets aan te passen. Trajectdifferentiatie kan dus bij verschillende waarden van het onderscheidingsvermogen worden uitgevoerd. Het effect van het instellen van het onderscheidingsvermogen op 90, 95 en 98 % is weergegeven in figuur 17.

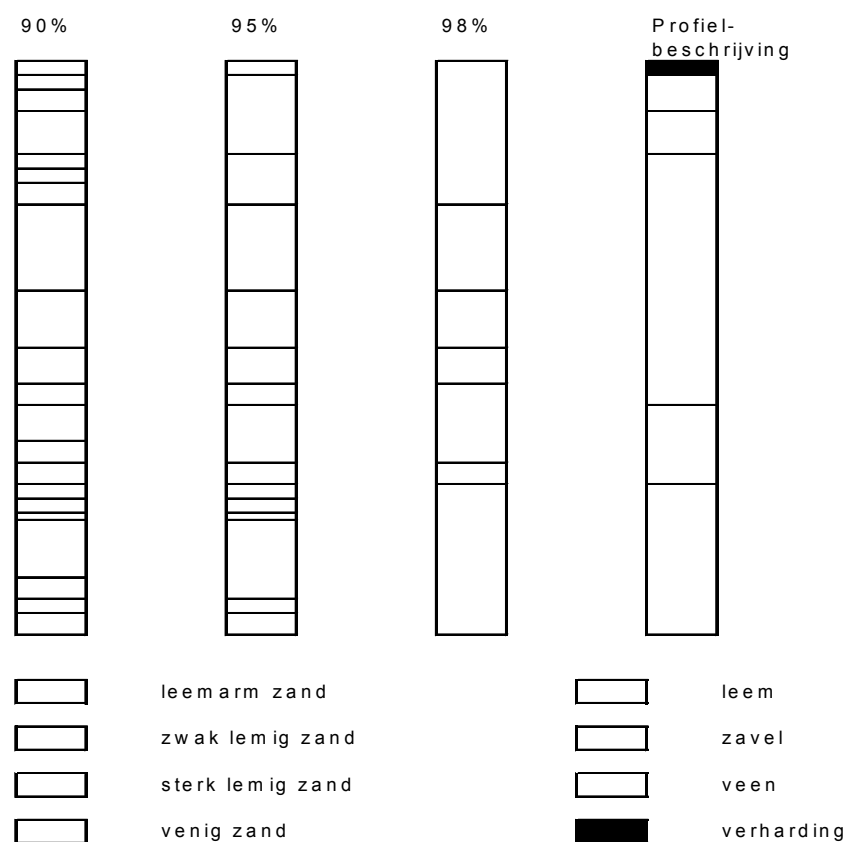


Fig. 17. De indeling van een bodemprofiel door toepassing van trajectdifferentiatie bij een onderscheidingsvermogen van 90 %, 95 % en 98 % en aan de hand van de profielbeschrijving.

Figuur 17 geeft aan dat het aantal lagen bij toenemend onderscheidingsvermogen afneemt. Het vaststellen van het onderscheidingsvermogen is arbitrair en is een instrument om de laagindeling zo goed mogelijk te laten aansluiten bij de karakterisering die nodig is om de stroming van olie of lucht zo goed mogelijk te beschrijven. Criterium hierbij kan zijn de mate waarin de onderscheiden lagen verschillende kenmerken met betrekking tot dit stromingsgedrag krijgen toebedeeld. In figuur 17 vindt de beoordeling plaats aan de hand van de grondsoortbenaming die aan de combinaties van conusweerstand en wrijvingsgetal kan worden toegekend. Deze toekenning is beschreven in 8.2.4.

Voor het profiel in figuur 17 leidt het onderscheidingsvermogen van 90 % frequent tot een opeenvolging van lagen met eenzelfde grondsoortbenaming. Het onderscheidingsvermogen van 90 % levert daarmee een nodeloos gedifferentieerd beeld van de bodemopbouw. Aan de andere kant maakt het onderscheidingsvermogen van 98 % beneden een diepte van 3,45 m geen onderscheid tussen een aantal meer en minder zandige lagen. De daar aanwezige verschillen worden uitgemiddeld tot een aantal opeenvolgende lagen die alle als lichte zavel worden gekarakteriseerd. Het onderscheidingsvermogen van 98 % levert dus een te weinig gedifferentieerd beeld. Voor het profiel in figuur 17 geeft het onderscheidingsvermogen van 95 % derhalve het meest bruikbare resultaat.

8.2.3 *Proceskundige keuzes*

Local boundary hunting 'zoekt' naar verschillen in split-windows van een bepaalde grootte. De grootte van het window is gebaseerd op de dikte van de lagen die naar verwachting van invloed kunnen zijn op het gedrag van olie of lucht. Verondersteld wordt dat een toename van de dikte van de laag groter dan circa 30 cm geen wezenlijke verandering veroorzaakt in de intreedruk van een slecht doorlatende of de doorlatendheid van een goed doorlatende laag. Het onderscheiden van laagovergangen op schaalniveaus groter dan circa 30cm is derhalve ten behoeve van het ontwerpen of dimensioneren van een persluchtinjectiesysteem niet relevant. Aan de andere kant is de meetschaal beperkend voor de raamgrootte. In een reeks meetwaarden op centimeterniveau is het aangeven van een laagovergang op het niveau van 2 cm (drie meetwaarden) het absolute minimum.

Op basis van deze beschouwingen is de local boundary hunting in dit rapport uitgevoerd voor split-windows van 2, 4, 8, 16 en 32 cm. Daarmee ontstaat inzicht in laagovergangen op deze opeenvolgende schaalniveaus.

8.2.4 *Trajectkarakterisering*

Trajectdifferentiatie is uitsluitend gebaseerd op overeenkomsten en verschillen in gemeten conusweerstand en wrijvingsgetallen. De schematisatie van de bodem in trajecten is daardoor onafhankelijk van de vertaling van deze meetgegevens naar gangbare bodemkarakteristieken, zoals grondsoort, of naar eventuele andere kenmerken die in relatie staan tot conusweerstand en/of wrijvingsgetal. Uiteindelijk is het natuurlijk wel deze vertaling die het nut van trajectdifferentiatie bepaald. De vertaalstap is echter veelal niet objectief maar afhankelijk van het oordeel van de 'deskundige'.

De meest gangbare interpretatie van sondeergegevens is de vertaling van gegevens over conusweerstand en wrijvingsgetal naar grondsoort. De relatie tussen deze grootheden is echter niet eenduidig. Zo leidt een toename van zowel het gehalte aan leem, aan klei als aan organische stof tot een toename van het wrijvingsgetal en kan een onderscheid tussen bijvoorbeeld humeus zand en lemig zand of tussen zandig veen en zavel zonder secundaire gegevens niet altijd worden gemaakt. Desalniettemin kunnen sondeergegevens toch een zinvolle eerste indruk geven van de grondsoorten die in het bodemprofiel voorkomen.

In de literatuur worden diverse indelingen naar grondsoort beschreven op basis van sondeergegevens [Robertson, 1990; CUR, 1992; Zhang en Tumay, 1996]. De indelingen sluiten echter niet volledig aan op de benamingen van de grondsoorten zoals die in Nederland gebruikelijk zijn of benoemen niet alle in Nederland voorkomende grondsoorten. Een globaal overzicht van conusweerstand en wrijvingsgetallen, zoals die in de gangbare in Nederland voorkomende grondsoorten voorkomen, is gegeven in figuur 18. In figuur 19 is het resultaat van een trajectdifferentiatie op een sondering weergegeven.

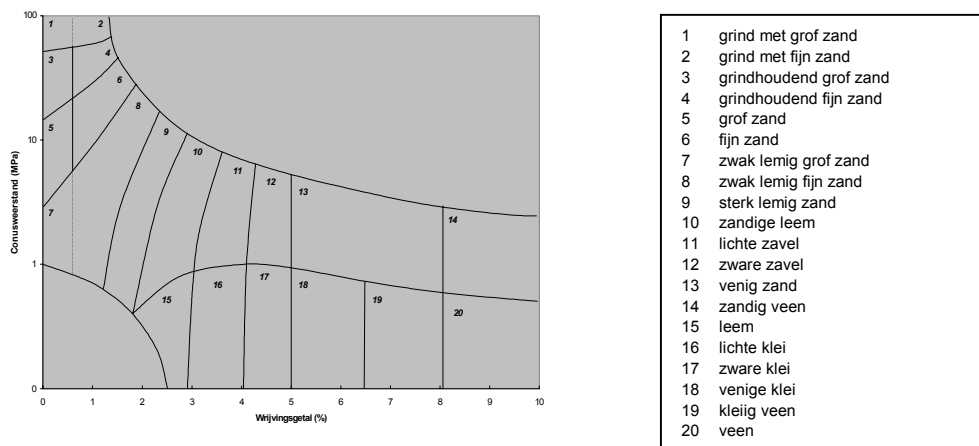


Fig. 18. Karakterisering van trajecten op basis van gemiddelde conusweerstand en wrijvingsgetallen.

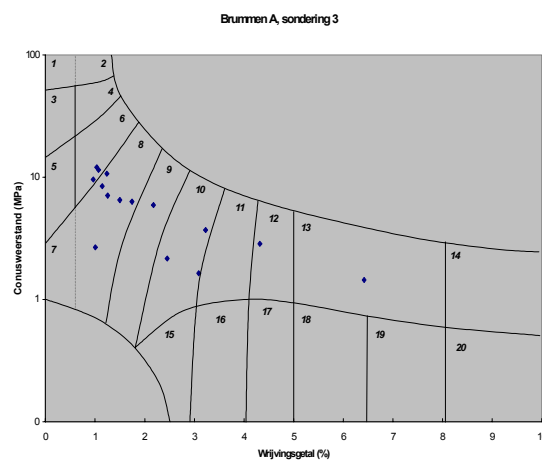


Fig. 19. Karakterisering van een bodemprofiel met behulp van trajectdifferentiatie

8.3 Horizontale indeling

De trajectdifferentiatie leidt tot een verticale indeling van sondeerprofielen. De afzonderlijke sondeerprofielen zijn gepositioneerd in het horizontale vlak en de verschillen tussen de verticaal ingedeelde profielen geven daarmee een indruk van de verschillen in horizontale richting. Anders dan voor de verticale richting is de informatie over de verschillen in horizontale richting echter niet continu maar incidenteel. Er is slechts hier en daar een sondering verricht. De informatiedichtheid in het horizontale vlak kan weliswaar worden vergroot door meer sonderingen uit te voeren maar bereikt daarmee nooit het dichtheidsniveau van de verticale richting. Principieel blijven in horizontale richting bodemgedeelten over waar de bodemkarakterisering niet is gebaseerd op meetgegevens ter plekke maar op interpretatie van meetgegevens in de meer of minder directe omgeving. Deze interpretatie gaat gepaard met onzekerheid.

In hoofdstuk 3 is een denkkader geschetst voor het karakteriseren van een bodem aan de hand van lagen, heterogeniteiten en ruis. Lagen onderscheiden zich van elkaar door structurele verschillen die aan eenduidig aan te wijzen bodemgedeelten kunnen worden toegewezen. Heterogeniteiten verschillen eveneens structureel van elkaar maar kunnen niet eenduidig aan specifieke bodemgedeelten worden toegewezen. De exacte ligging van de heterogeniteiten is onzeker en het voorkomen ervan kan slechts worden gekarakteriseerd aan de hand van een

'kans

op

aanwezigheid'.

Ruis tenslotte vertegenwoordigt alle niet-structurele verschillen. Deze kunnen, evenals de verschillen tussen heterogeniteiten, niet eenduidig aan specifieke bodemgedeelten worden toegerekend. Lagen of heterogeniteiten, waarin veel niet-structurele verschillen aanwezig zijn, kunnen zich echter, bijvoorbeeld ten aanzien van intreedruk en doorlatendheid, anders gedragen dan lagen of heterogeniteiten die homogener zijn. De mate van ruis is derhalve een belangrijke karakteristiek van de laag of de heterogeniteit. De mate van ruis kan worden uitgedrukt als het bereik tussen de minimale en de maximale waarde of als de variantie.

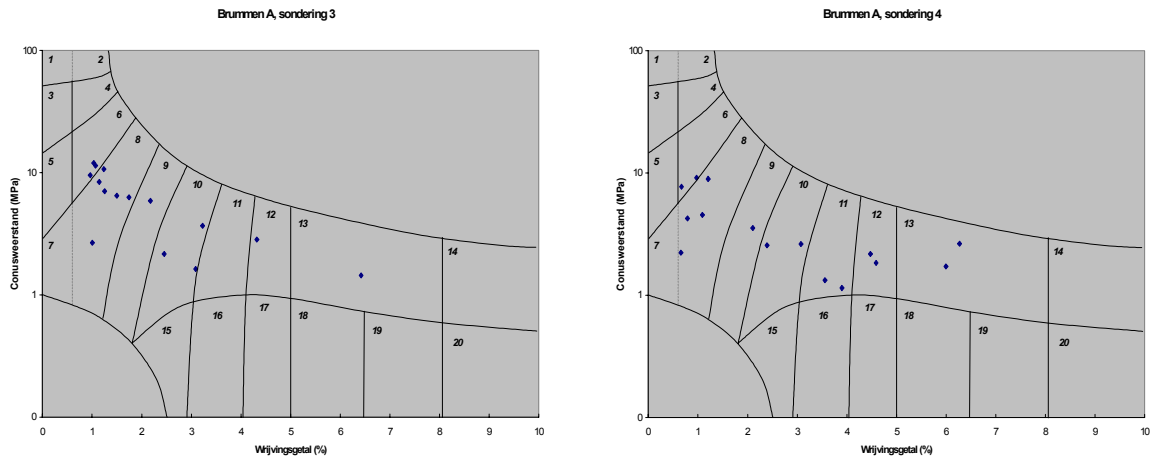


Fig. 20. Karakterisering van de trajecten in twee profielen op de locatie Brummen A .

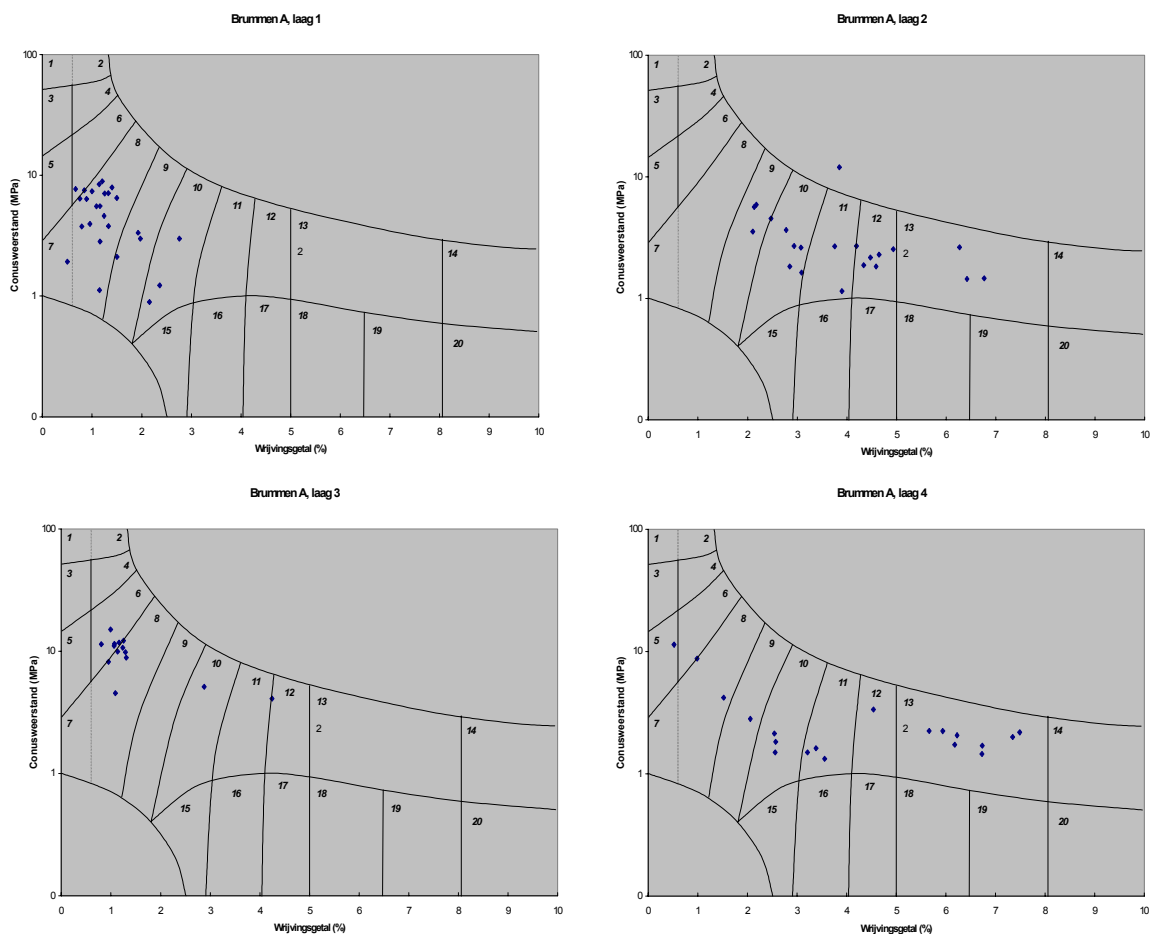


Fig. 21. Karakterisering van naar laag gesorteerde trajecten op de locatie Brummen A.

Op de locatie Brummen A blijken in de verzadigde zone van de bodem tot circa 4,5 m diepte in het algemeen vier lagen te kunnen worden onderscheiden. Achtereenvolgens een zandige laag, een zavelige laag, opnieuw een zandige laag en een zavelig/lemige/venige laag. De karakterisering van de trajecten in deze lagen voor twee profielen zijn weergegeven in figuur 20. Op de locatie Brummen A zijn in totaal acht sonderingen verricht en door middel van trajectdifferentiatie op overeenkomstige wijze verwerkt als in figuur 29 is gepresenteerd. De resultaten zijn vervolgens per laag samengevoegd, zodat een beeld ontstaat van de samenstelling van de lagen. Dit is weergegeven in figuur 21.

Uit figuur 21 blijkt dat de lagen 1 en 3 voornamelijk uit leemarm (code 6) en zwak lemig fijn zand (code 8) bestaan, waarbij met name in laag 1 'lenzen' van sterk lemig zand (code 9) en zandige leem (code 10) voorkomen. De lagen 2 en 4 zijn sterk heterogeen. Het merendeel van de trajecten in laag 2 bestaat uit zandige leem (code 10), lichte (code 11) en zware zavel (code 12). Het onderscheid tussen deze grondsoorten is overigens moeilijk te maken, zodat een algemene typering van de laag als lemig of zavelig wellicht op zijn plaats is. In de laag komen zandige heterogeniteiten voor, zowel lemig (code 9) als venig (code 13). Laag 4 bevat ongeveer evenveel trajecten die als venig zand (code 13) te benoemen zijn als lemige (code 10) en zavelige trajecten (codes 11 en 12). Tevens komen in de laag ook nog enkele leemarme (codes 5 en 6) en zwak lemige zandlensjes (code 8) voor. Laag 4 is derhalve nog heterogener van karakter dan laag 2.

8.4 Bodemkarakterisatie

Welke trajecten vormen heterogeniteiten?

Aan de hand van figuur 21 kunnen de trajecten worden ingedeeld als 'behorend tot de bulk' of als heterogeniteit. Hierbij speelt proceskennis een belangrijke rol. Bij de beoordeling ten behoeve van de toepasbaarheid van perslucht zullen lemige zandlaagjes in een bulk van leemarm zand veelal als heterogeniteit worden beschouwd omdat zij een (ongewenste) verstoring van het luchtstromingspatroon kunnen veroorzaken. In een bulk van zandige leem hoeft dat niet te gelden voor zandige laagjes maar mogelijk wel voor kleiïge of venige laagjes. In een laag die overwegend uit zandige leem bestaat, hoeven dan alleen de kleiïge of venige laagjes als heterogeniteit te worden gekarakteriseerd. In een zavelige of kleiïge laag kunnen juist zandlaagjes als relevante heterogeniteiten worden aangemerkt omdat juist zij voor een afwijkend gedrag van de laag als geheel kunnen zorgen. Sterker kleiïge of venige laagjes zijn in een zavelige of kleiïge laag vermoedelijk van relatief weinig invloed en kunnen dan eerder tot de bulk worden gerekend.

Welke afmetingen hebben de heterogeniteiten?

Van de trajecten binnen een laag die als heterogeniteit zijn benoemd, zijn de dikten bekend. Deze vormen een bereik aan waarden dat gekarakteriseerd kan worden aan de hand van bijvoorbeeld de minimum- en de maximumwaarde. De lengte van de trajecten is onbekend. Echter, aangenomen kan worden dat de variabiliteit, zoals die in verticale richting is waargenomen, ook in horizontale richting bestaat en dat de lengte van een traject lineair is gerelateerd aan de dikte. De lengte van een traject kan in dat geval worden benaderd door de dikte van het traject te vermenigvuldigen met de verhoudingsfactor tussen de lengte van het te modelleren gebied en de lengte van het sondeerprofiel door de laag waarin zich het traject bevindt. Dit is weergegeven in figuur 22. Er geldt dan:

$$l_{\text{traj}} = \frac{L_{\text{modelgebied}}}{s_1} \cdot d_{\text{traj}}$$

waarin:

l_{traj} is de lengte van een traject;
 $L_{\text{modelgebied}}$ is de lengte van het te modelleren gebied;
 s_j is de totale sondeerlengte;
 d_{traj} is de gemiddelde dikte van de trajecten.

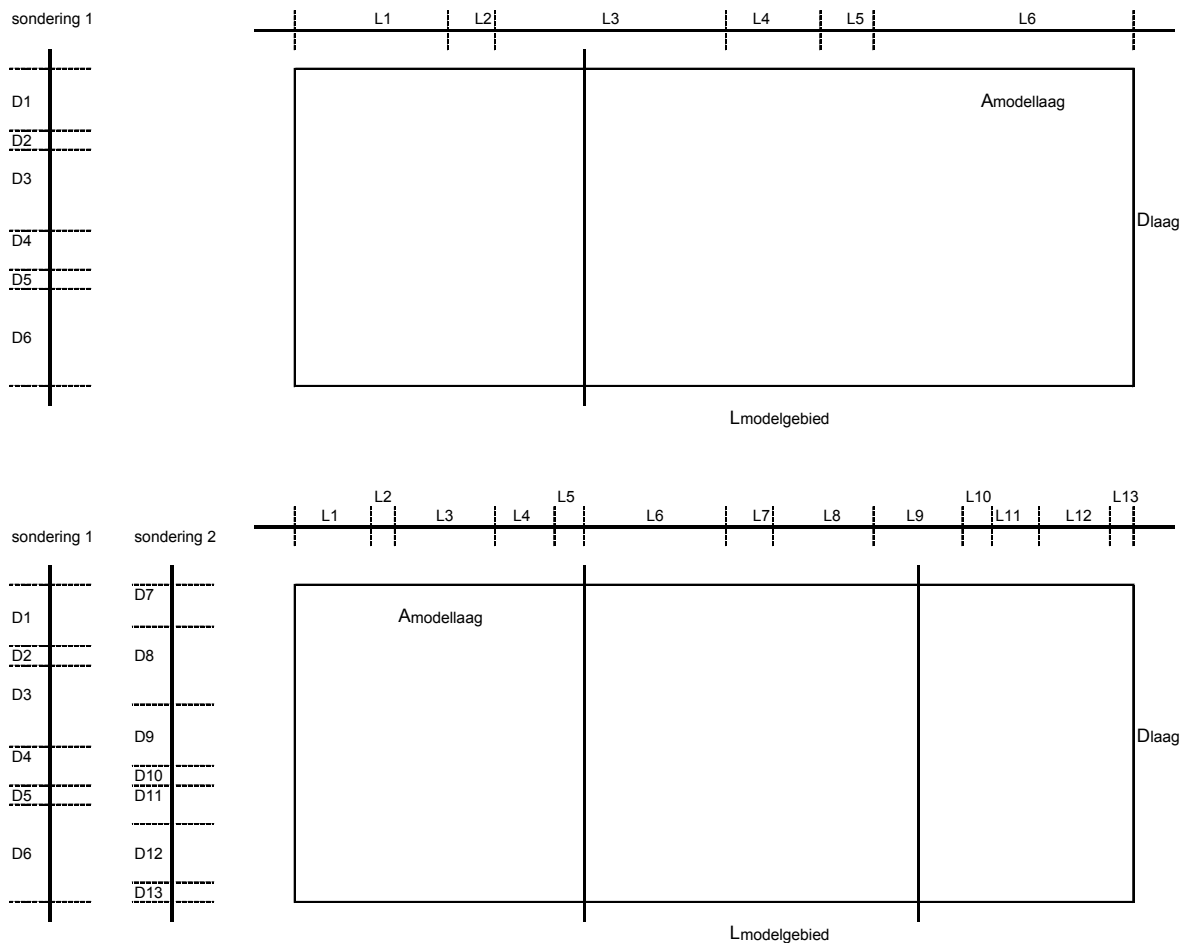


Fig. 22. Schatting van de lengte van trajecten uit de dikte ervan.

In figuur 22a is de lengte van het te modelleren gebied tweemaal de dikte van de laag waarin bij één sondering zes trajecten zijn aangetroffen. De lengte van de trajecten is daarom geschat op tweemaal de dikte. De verhouding tussen de lengten van de afzonderlijke trajecten is gelijk aan de verhouding tussen de dikten. Dit is aangegeven op de horizontale as boven de doorsnede. Het gearceerde gebied geeft de veronderstelde onderzochte oppervlakte van de modellaag weer. Figuur 22b geeft de situatie weer indien in dezelfde laag nóg een sondering is gedaan. De sondeerlengte is dan tweemaal zo groot. Als gevolg daarvan wordt de benaderde lengte van de trajecten tweemaal zo klein. Dit is 'vreemd' indien de werkwijze wordt beschouwd als een methode om de werkelijke lengte zo goed mogelijk te schatten. In eerste instantie is dit dan ook niet het geval. De werkwijze dient vooral om het dwarsprofiel ook in horizontale richting aan de hand van een objectief criterium in te vullen. Bij weinig gegevens bestaat de schematisatie uit lagen met minder maar grotere trajecten, bij meer gegevens uit lagen met méér maar kleinere trajecten. Meer sonderingen levert dus een meer gedetailleerd beeld.

Waaruit bestaan de heterogeniteiten en de resterende bulk?

Evenals voor de dikte kan aan de hand van de grondsoortclassificatie voor zowel de heterogeniteiten als voor de resterende trajecten binnen een laag minimum- en maximumwaarden van

daaraan gerelateerde bodemkarakteristieken worden gegeven. Zie hiervoor bijvoorbeeld de tabellen 8 (intreedruk) en 9 (doorlatendheid).

Hoeveel heterogeniteiten zijn er?

Onder de eerder aangenomen lengte-dikteverhouding van de heterogeniteiten (trajecten) kan de oppervlakte van de dwarsdoorsnede, die door middel van sonderingen is onderzocht (A_{son}), worden geschat uit de gemiddelde lengte van de trajecten en de totale sondeerlengte door de betreffende laag:

$$A_{son} = l_{gem} \cdot s_l = \frac{L_{modelgebied}}{s_l} \cdot d_{gem} \cdot s_l = L_{modelgebied} \cdot d_{gem} = L_{modelgebied} \cdot \frac{s_l}{N_{traj}}$$

waarin:

- A_{son} is de oppervlakte van de dwarsdoorsnede die met sonderingen is onderzocht;
- l_{gem} is de gemiddelde lengte van de trajecten;
- d_{gem} is de gemiddelde dikte van de trajecten;
- N_{traj} is het aantal aangetroffen trajecten in de sonderingen.

De heterogeniteitsdichtheid van een laag kan dan worden weergegeven als het aantal aangetroffen relevante heterogeniteiten in die laag per onderzochte oppervlakte:

$$H = \frac{N_{het}}{A_{son}}$$

waarin:

- H is de heterogeniteitsdichtheid van de laag;
- N_{het} is het aantal aangetroffen heterogeniteiten in de laag.

Het aantal heterogeniteiten N in een te modelleren dwarsdoorsnede van de bodem bedraagt dan:

$$N = N_{het} \cdot \frac{A}{A_{son}} = H \cdot A$$

waarin:

- A is de oppervlakte van de dwarsdoorsnede van de laag.

De karakterisering van de bodem vanuit persluchtperspectief is voor de locatie Brummen A uitgewerkt in tabel 11 en figuur 23.

Tabel 11. Karakterisering van de bodemopbouw op locatie Brummen A.

aard	grondsoort	intreedruk (mbar)		doorlatendheid (m/dag)		dikte (cm)		H
		min.	max.	min.	max.	min.	max.	
laag 1 heterogeniteit	zwak lemig zand	15	60	0,5	2,0	-	-	0,93
	zandige leem	100	500	0,05	0,2	11	69	
laag 2 heterogeniteit	lichte zavel	150	200	0,05	0,2	-	-	1,7
	sterk lemig tot venig zand	30	50	0,1	1,0	9	26	
laag 3 heterogeniteit	zwak lemig zand	15	60	0,5	2,0	-	-	0,79
	zandige leem	100	500	0,05	0,2	17	18	

laag 4 heterogeniteit	lichte zavel	150	200	0,05	0,2	-	-	4,3
	zwak lemig tot venig zand	15	60	0,5	2,0	6	34	

Uit tabel 11 blijkt dat de karakterisering op basis van trajectdifferentiatie naast een kwalificatie van de aard van bodemlagen en van heterogeniteiten daarin, ook de (kans)dichtheid van de heterogeniteiten en de variatie in afmetingen ervan levert. Trajectdifferentiatie levert daarmee de mogelijkheid om de heterogeniteit van bodems kwantitatief te vergelijken. In het kader van 'Imbitie en drainage' wordt dit in de cluster "Perslucht" toegepast om grip te krijgen op de invloed van bodemheterogeniteit op de voorspelbaarheid van persluchtstroming.

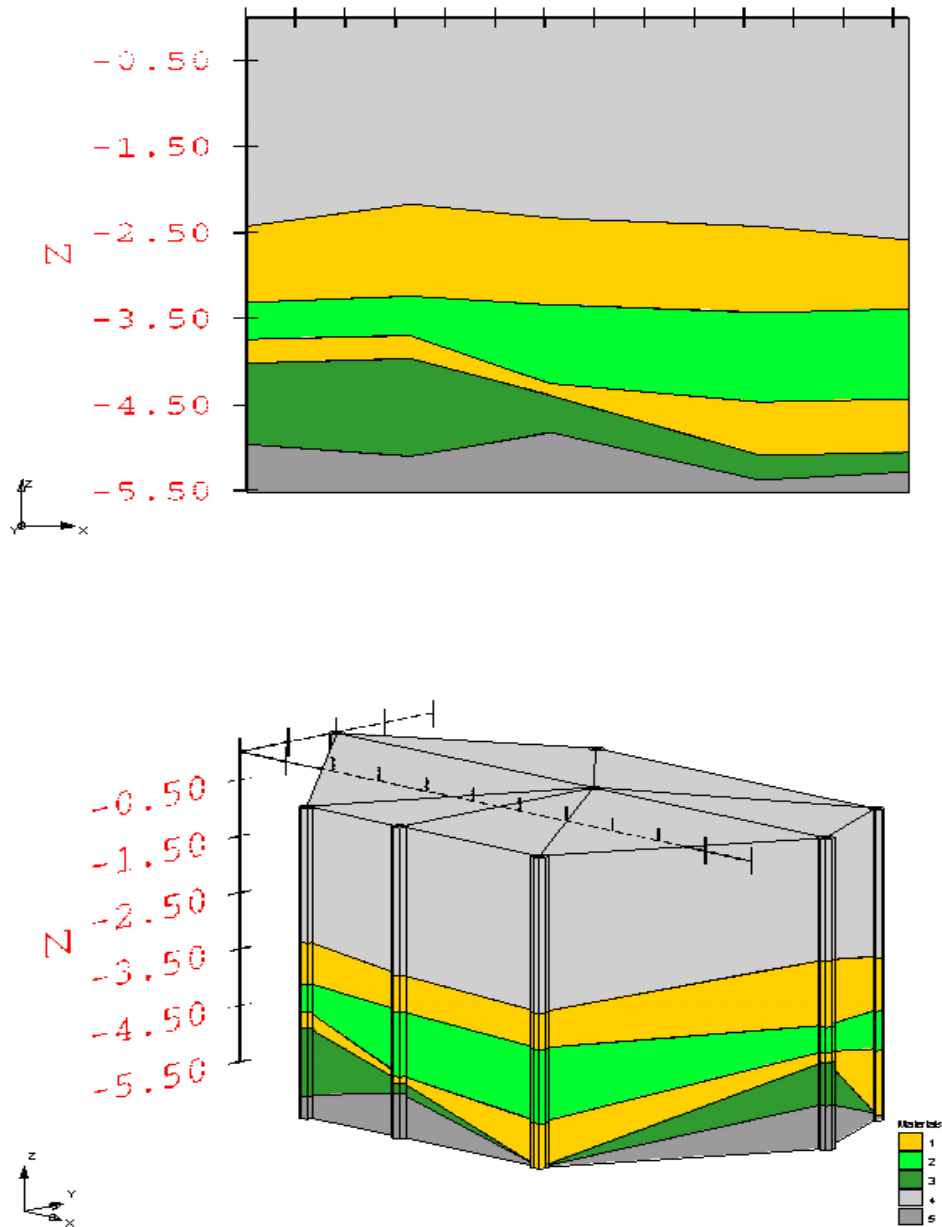


Fig. 23. Schematisatie van de bodemopbouw vanuit persluchtperspectief voor de locatie Brummen A (1 zwak lemig zand, weinig heterogeen; 2 zavel, heterogeen; 3 zavel, sterk heterogeen; 4 onverzadigde zone; 5 niet onderzocht).

HOOFDSTUK 9

CONCLUSIES

Voor het zoneren van olieverontreinigingen wordt aanbevolen sonderingen te verrichten waarbij naast de conusweerstand en het wrijvingsgetal ten minste ook de fluorescentie wordt gemeten. Sondeergegevens hebben als voordeel dat zij informatie leveren op een schaalniveau dat beter dan bij enige andere, in de praktijk toepasbare meettechniek aansluit bij het schaalniveau waarop processen van imbibitie en drainage plaatsvinden. Daarnaast kunnen sondeereenheden gemakkelijk worden uitgebreid met aanvullende meetapparatuur, waaronder sondes voor het meten van de fluorescentie, de zuurstofconcentratie en de redoxtoestand en met monsternameapparatuur voor het verkrijgen van monsters voor chemische analyse. De verkregen meetresultaten kunnen bovendien via trajectdifferentiatie op een reproduceerbare en controleerbare wijze worden verwerkt.

Indien geen gebruik kan worden gemaakt van sondeergegevens kan de retentiezone in beeld worden gebracht met behulp van de olie-op-watertest of door middel van geurwaarnemingen.

De reproduceerbaarheid van de olie-op-watertest bedraagt circa 90 % met een nauwkeurigheid voor de ligging van de retentiezone bij de in dit onderzoek gehanteerde meetstrategie van circa 40 tot 70 %. Deze nauwkeurigheid kan worden vergroot door het aantal waarnemingen te vergroten. In dat kader wordt aanbevolen ten minste in iedere bodemlaag en eenmaal per 25 cm een olie-op-watertest te verrichten. Tevens wordt aanbevolen het meetraster bij de grens tussen de retentie- en de retardatiezone te verdichten. Een protocol voor het gebruik van de olie-op-watertest bij het vaststellen van de omvang en de ligging van de retentiezone is opgenomen in bijlage D.

De reproduceerbaarheid van de geurwaarnemingen bedroeg in dit onderzoek circa 86 % met een nauwkeurigheid voor de ligging van de retardatiezone bij de in dit onderzoek gehanteerde meetstrategie van 50 tot 60 %. Uit oogpunt van arbeidshygiëne wordt het verrichten van geurwaarnemingen echter afgeraden.

Zonering op basis van geurwaarnemingen behoeft ondersteuning van chemische analyse. Met de fieldkit bepaalde gehalten blijken hiervoor vooralsnog geen alternatief.

De zuurstofconcentratie, zoals die met de zuurstofsonde wordt gemeten, is weliswaar maar matig reproduceerbaar maar toch voldoende om bij een groot aantal metingen en met het grove beoordelingscriterium 'groter of kleiner dan 2 mg/l' toch een redelijk nauwkeurig beeld van de omvang en de ligging van de aërobe en de anaërobe zone te leveren. In dit onderzoek bedroeg de nauwkeurigheid waarmee de ligging van de aërobe zone kon worden vastgesteld circa 70 tot 90 %.

De zuurstofsonde is vrij gevoelig gebleken voor mechanische storingen. Tevens is het gebruik vrij bewerkelijk. De elektroden kunnen echter ook worden ingebouwd in sondeerapparatuur, waardoor zij robuuster en gemakkelijker te gebruiken zijn. Het gebruik van de zuurstofsonde in de geteste vorm wordt daarom afgeraden.

De redoxpotentialen, zoals die met de redoxsonde zijn gemeten, vertonen geen eenduidige relatie met de zuurstofconcentratie. De metingen geven wel aan dat zuurstof niet meer maatgevend is voor de milieuchemische omstandigheden in het bodemwater bij concentraties die kleiner zijn

dan circa 2 mg/l. De grens tussen de aërobe en de anaërobe zone is daarom vooralsnog bij deze waarde gelegd.

Aan het gebruik van de redoxsonde kleven dezelfde bezwaren als aan het gebruik van de zuurstofsonde. Ook de redoxelektroden kunnen worden ingebouwd in een sondeereenheid waarvan het gebruik vooralsnog aantrekkelijker lijkt dan in de geteste vorm.

De olie-op-waterreactie is al positief vanaf gehalten van circa 300 mg/kg. Dit duidt erop dat olie een sterke voorkeur heeft om in de bodem als een afzonderlijke (olie)fase achter te blijven en vermoedelijk vaker in de vorm van oliedruppeltjes aanwezig is dan waarvan in de gangbare 'denkmodellen' wordt uitgegaan.

Trajectdifferentiatie is in staat grote hoeveelheden sondeergegevens op een uniforme, geautomatiseerde manier te verwerken. Trajectdifferentiatie staat daarmee voor een objectieve, reproduceerbare en controleerbare gegevensverwerking. Trajectdifferentiatie waarborgt niet de waarde van de verkregen sondeergegevens. Een kritische beoordeling blijft op zijn plaats voor de mate waarin grondsoorten kunnen worden afgeleid uit de conusweerstand en het wrijvingsgetal en de mate waarin verontreiniging kan worden afgeleid uit de fluorescentie. Daarnaast moet een punt van aandacht zijn de mate waarin voor persluchtinjectie relevante bodemkenmerken als intreedruk en doorlatendheid uit de grondsoort kunnen worden afgeleid.

Een belangrijk voordeel van trajectdifferentiatie is verder dat behalve inzicht in de aard van de bodemlagen, ook kwantificering van de heterogeniteit plaatsvindt. Door deze kwantificering kunnen bodemlagen ten aanzien van heterogeniteit met elkaar worden vergeleken. Tevens kan de kwantificering een getalsmatige basis vormen voor een stochastische beschrijving van processen die door de heterogeniteit van de bodem worden beïnvloed.

LITERATUUR

Clayton, W.S., 1996.

Air channeling in uniform soils: the exception rather than the rule.

In: Proceedings of the First International Symposium on In Situ Air Sparging for Site Remediation, October 24-25, 1996, Las Vegas.

Cultuurtechnische vereniging, 1988.

Cultuurtechnisch Vademecum.

Werkgroep Herziening Cultuurtechnisch vademecum, p. 464.

CUR, 1992.

Construeren met grond. Grondconstructies op en in weinig draagkrachtige en sterk samendrukbare ondergrond.

Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving, CUR-publicatie 162, 2^e druk, Gouda.

Davis, J.C., 1986.

Statistics and Data Analysis in Geology.

Second edition, pp. 211-214.

Gill, D., 1970.

Application of a statistical zonation method to reservoir evaluation and digitized-log analysis.

Bull. American Assoc. Petroleum Geologists, 54(5), pp. 719-729.

Hawkins, D.M. en D.F. Merriam, 1973.

Optimal zonation of digitized sequential data.

Jour. Int'l Assoc. Mathematical Geology, 5(4), pp. 389-395.

Hawkins, D.M. en D.F. Merriam, 1974.

Zonation of multivariate sequences of digitized geologic data.

Jour. Int'l Assoc. Mathematical Geology, 6(3), pp. 263-269.

Jessen, R.J., 1978.

Statistical Survey Techniques.

Wiley, New York.

Locher, W.P. en H. de Bakker, 1991.

Bodemkunde van Nederland. Deel 1: Algemene Bodemkunde.

Stichting Bodemkartering, Malmberg, Den Bosch.

Ridder, N.A. de, 1977.

Bepaling van geohydrologische constanten volgens klassieke onderzoeksmethoden.

H₂O (10), nr. 2, pp. 34-44.

Robertson, P.K., 1990.

Soil classification using the cone penetration test.

Can. Geotech. J., 27, pp. 151-158.

Webster, R., 1973.

Automatic soil-boundary location from transect data.

Jour. Int'l Assoc. Mathematical Geology, 5(1), pp. 27-37.

Zhang, Z. en M.T. Tumay, 1996.

Simplification of soil classification charts derived from the cone penetration test.

Geotechnical Testing Journal, vol. 19, nr. 2, pp. 203-216.

BIJLAGE A

ZINTUIGELIJKE WAARNEMINGEN EN ANALYSERESULTATEN

BIJLAGE B

ZUURSTOFMETINGEN

BIJLAGE C

REDOXMETINGEN

BIJLAGE D

PROTOCOL VOOR OLIE-OP-WATERTEST ZONERING

Benodigdheden:

- Oliepan.
- Helder water, bij voorkeur leidingwater.

Werkwijze:

1. Vul de vakjes van de oliepan voor 3/4 met water.
2. Verricht de boring en neem uit iedere bodemlaag en ten minste uit ieder dieptetraject van 25 cm een hoeveelheid grond van 1 - 2 cm³ en dompel dit in een van de vakjes van de oliepan.
3. Noteer de positieve of negatieve reactie van de olie-op-watertest in de boorstaat. Indien geen oliefilmpje zichtbaar is geworden, kan hetzelfde vakje van de oliepan worden gebruikt voor de beoordeling van een nieuwe bodemlaag.
4. Als in ieder vakje een oliefilmpje is verschenen, moet de oliepan worden schoongespoeld. Hierna kunnen de vakjes opnieuw worden gevuld met schoon water.

BIJLAGE E

**ANALYSEGEGEVENS VAN GRONDMONSTERS VOOR HET AFLEIDEN VAN DE
DOORLATENDHEID EN DE INTREEDRUK VAN BODEMLAGEN**