

NOBIS 95-2-02
IMBITIE EN DRAINAGE (I & D)

Evaluatierapport

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.)
ir. A.H. van de Velde (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, "©"Imbibitie en drainage (I & D) - Evaluatierapport", 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, "©"Imbibition and drainage (I & D) - Evaluation report", 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

Imbibitie en drainage (I & D)

CUR/NOBIS rapportnummer

95-2-02

Evaluatierapport

Project rapportnummer

95-2-02

Auteur(s)

ir. K.R. Weytingh
ir. P.O. de Vries
ir. A.H. van de Velde

Aantal bladzijden

Rapport: 27
Bijlagen: -

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

Het doel van het project is het vertalen van kennis over het gedrag van olie, lucht en water in de bodem naar bruikbare objectieve instrumenten om een in situ sanering van een locatie verontreinigd met olie succesvol te maken. Het project heeft vier concrete eindproducten opgeleverd die breed toegepast kunnen worden in de hedendaagse sanering van met olie verontreinigde locaties.

Zonering dient om bron en pluimzone van elkaar te onderscheiden met behulp van een aantal standaard-technieken. Dit is van essentieel belang voor het slagen van intensieve in situ saneringen. De toepasbaarheid van saneringstechnieken en risico's (humaan, ecologisch en verspreiding) worden bepaald door eigenschappen van bodem en verontreiniging.

De oliekarakterisatie is een objectieve methode om eigenschappen van een olieverontreiniging te bepalen die nodig zijn om antwoord op de vraag te geven of de olie die op de locatie aanwezig is uitdampbaar, uitspoelbaar of afbreekbaar is. Op basis daarvan kan de toepasbaarheid van saneringstechnieken worden bepaald. Tevens kunnen humane en ecotoxicologische risico's worden ingeschat en kan de mate van verspreiding worden vastgesteld en het effect daarvan op een stabiele eindsituatie.

Het derde product is trajectdifferentiatie, een objectieve statistische techniek om sondeergegevens geautomatiseerd te vertalen naar een dwarsprofiel met pakketten met eenzelfde eigenschap. Het resultaat is toegespitst op het toepassingsgebied. Bijvoorbeeld voor perslucht kunnen significante overgangen worden aangegeven en de mate waarin in een pakket horizontale storingen (andere intreeweerstand) aanwezig zijn.

Het laatste product zijn de dimensioneringshandvatten persluchtinjectie. De toepasbaarheid van persluchtinjectie wordt bepaald door de vraag of de perslucht in voldoende mate terechtkomt op die plaatsen in de bodem waar ze ook terecht moet komen. Deze vraag wordt veelal beantwoord op basis van 'expert judgement' of een persluchtinjectieproef. De dimensioneringshandvatten bieden een objectief alternatief in de vorm van ontwerpregels.

Trefwoorden**Gecontroleerde termen:**

bodemprofiel, in situ, olie, oplosbaarheid, zonering

Vrije trefwoorden:heterogeniteit, oliekarakterisatie
persluchtinjectie**Titel project**

Imbibitie en drainage (I & D)

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

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

Report title
Imbibition and drainage (I & D)

CUR/NOBIS report number
95-2-02

Evaluation report

Project report number
95-2-02

Author(s)
ir. K.R. Weytingh
ir. P.O. de Vries
ir. A.H. van de Velde

Number of pages
Report: 27
Appendices: -

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 aim of the project is the translation of knowledge about processes concerning oil, air and water in the soil environment in usable objective instruments which can be used to successfully remediate an oil contaminated site. The project yielded for four concrete products which can be applied in a variety of situations frequently met on oil contaminated sites.

Zoning offers methods to discriminate between the retention or source zone and the retardation or plume zone. The difference between these zones is of vital importance to successfully plan and design an intensive in situ remediation.

The applicability of remediation techniques and the risks for humans and ecosystem are dominated by the characteristics of the soil and the contamination within it. The oil characterization is a method to objectively evaluate the potentials of an oil contamination for vaporization, solubilization and attenuation.

The third product is the trajectory differentiation. Trajectory differentiation is a statistical technique to translate probe data in an objective and for the greater part automatic way to a schematization of the soil profile in layers with similar characteristics. The degree of detail is related to the field of interest. The modeller of an air sparging system for instance needs a differentiation on a centimeter scale.

The last product are handles to design an air sparging system. The applicability of air sparging is greatly determined by the degree in which air contacts the areas in the soil where it is needed. These question is normally answered by expert judgement or field tests. The handles offer an objective alternative.

Keywords

Controlled terms:
in situ, oil, soil structure, solubility, zoning

Uncontrolled terms:
air sparging, heterogeneity, oil
characterization

Project title
Imbibition and drainage (I & D)

Projectmanagement
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 "Verbetering van de positie van de in situ biodegradatievariant door toevoeging van imbibitie en drainage aan bestaande theorie" dat de afkorting 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 genaamd 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 "Evaluatierapport".

The Three Engineers
juli 2000

INHOUD

	SAMENVATTING	v
	SUMMARY	vi
Hoofdstuk 1	HET PROJECT IMBITIE EN DRAINAGE	1
	1.1 Inleiding	1
	1.2 Vier producten uit het I & D-project	1
	1.3 Verschenen rapportages	3
Hoofdstuk 2	ZONERING	4
	2.1 Achtergrond	4
	2.2 Sonderingen met fluorescentieconus	5
	2.3 Boringen en olie-op-watertest	6
	2.4 Boringen en geurwaarnemingen	7
	2.5 Toepassingsgebied	8
Hoofdstuk 3	OLIEKARAKTERISATIE	10
	3.1 Achtergrond	10
	3.2 Oliekarakterisatie	11
	3.3 Toepassingsgebied	14
Hoofdstuk 4	TRAJECTDIFFERENTIATIE	16
	4.1 Achtergrond	16
	4.2 Trajectdifferentiatie	16
	4.3 Toepassingsgebied	20
Hoofdstuk 5	DIMENSIONERINGSHANDVATTEN VOOR PERSLUCHTINJECTIE	22
	5.1 Achtergrond	22
	5.2 Dimensioneringshandvatten voor persluchtinjectie	23
	5.3 Toepassingsgebied	26

SAMENVATTING

Imbibitie en drainage (I & D)

Het doel van het project is het vertalen van kennis over het gedrag van olie, lucht en water in de bodem naar bruikbare objectieve instrumenten om een in situ sanering van een locatie verontreinigd met olie succesvol te maken.

De afgelopen jaren is een speurtocht verricht naar kennis over het gedrag van olie, lucht en water in de bodem. De speurtocht is buiten de grenzen van het geëigende kennisveld getreden. Begonnen is in de mijnbouw bij Enhanced Oil Recovery waar de term imbibitie en drainage vandaan komt. Imbibitie en drainage zijn capillaire processen gekoppeld aan het vloeistofgedrag van water, lucht en olie in een poreus medium. Vanuit de procestechnologie komen de aanknopingspunten voor de interactie op molecuulniveau tussen de drie vloeistoffen. De statistiek en geofysica gaven houvast om het effect van bodemlaagjes op de stroming van de vloeistoffen objectief vast te stellen.

Het project heeft vier concrete eindproducten opgeleverd die breed toegepast kunnen worden in de hedendaagse sanering van met olie verontreinigde locaties.

Zonering dient om bron en pluimzone van elkaar te onderscheiden met behulp van een aantal standaardtechnieken. Dit is van essentieel belang voor het slagen van intensieve in situ saneringen. Hiervoor kunnen standaardtechnieken worden gebruikt, zoals olie-op-watertest, minerale olie-analyse, oliesondering en geurmetingen. In de studie is vastgesteld hoe met deze instrumenten een bronzone kan worden gevonden, wat de nauwkeurigheid van de technieken is, waar de omslagpunten liggen en welke techniek wanneer het best gebruikt kan worden.

De toepasbaarheid van saneringstechnieken, risico's (humaan, ecologisch) en uitloging uit de bron in relatie tot sanering van de pluim, worden bepaald door eigenschappen van bodem en verontreiniging. De oliekarakterisatie is een objectieve methode om eigenschappen van een oliebron te bepalen die nodig zijn om antwoord op de vraag te geven of de olie die op de locatie aanwezig is uitdampbaar, uitspoelbaar of afbreekbaar is en of die olie humane, ecotoxicologische en verspreidingsrisico's kan veroorzaken. Met de minerale oliefactor ('mofactor') kunnen de eigenschappen vertaald worden naar reeds uitgevoerde conventionele GC-analyses.

Het derde product is trajectdifferentiatie, een objectieve statistische techniek om sondeergegevens geautomatiseerd te vertalen naar een dwarsprofiel met pakketten met eenzelfde eigenschap. Het resultaat is toegespitst op het toepassingsgebied. Voor de geohydroloog of bodemluchtonttrekkingsmodeller kunnen pakketten met eenzelfde doorlatendheid worden aangegeven met een index voor slecht doorlatende laagjes (aantal, horizontale en verticale omvang). Voor perslucht kunnen significante overgangen worden aangegeven en de mate waarin in een pakket horizontale storings (andere intreeweerstand) aanwezig zijn.

Het laatste product zijn de dimensioneringshandvatten persluchtinjectie. De toepasbaarheid van persluchtinjectie wordt bepaald door de vraag of de perslucht in voldoende mate terecht komt op die plaatsen in de bodem waar ze ook terecht moet komen. Deze vraag wordt veelal beantwoord op basis van 'expert judgement' of een persluchtinjectieproef. De dimensioneringshandvatten bieden een objectief alternatief.

SUMMARY

Imbibition and drainage (I & D)

The aim of the project is the translation of knowledge about processes concerning oil, air and water in the soil environment in usable objective instruments which can be used to successfully remediate an oil contaminated site.

In the last decades a lot of research has been done to elucidate the behaviour of oil, air and water phases in the soil environment. Now, this research has reached the boundaries of the appropriate fields of interest. 'Enhanced Oil Recovery' in mining engineering supplied for the concepts of imbibition and drainage in which capillary processes can be integrated with liquid movement of oil, air and water in porous media. Process technology offered possibilities to describe the molecular interactions between the phases. Statistics and geophysics supported to objectively implement the effects of heterogeneity of soil on the movement of liquids.

The project yielded for four concrete products which can be applied in a variety of situations frequently met on oil contaminated sites.

Zoning offers methods to discriminate between the retention or source zone and the retardation or plume zone. The difference between these zones is of vital importance to successfully plan and design an intensive in situ remediation. Zoning supplies the use of more or less simple techniques like the 'oil on water' test, chemical analyses of 'mineral oil', the oil probe and sensory perception. The study shows how these techniques should be used, how accurate they are, if turn over points exist and what they are and in generally what technique prefers.

The applicability of remediation techniques and the risks for humans and ecosystem are dominated by the characteristics of the soil and the contamination within it. The oil characterization is a method to objectively evaluate the potentials of an oil contamination for vaporization, solubilization and attenuation. The oil characterization therefore offers the opportunity to plan and design a remediation strategy for a contaminated site as well as to quantify risks for humans and the environment. In addition the 'mo-factor' translates the characteristics obtained from the oil characterization to the information which normally is available.

The third product is the trajectdifferentiation. Trajectdifferentiation is a statistical technique to translate probe data in an objective and for the greater part automatical way to a schematization of the soil profile in layers with similar characteristics. The degree of detail is related to the field of interest. The geohydrologist or the modeller of soil venting systems may be content with a differentiation in layers of several decimeters, the modeller of air sparging systems however needs a differentiation on a centimeter scale. To all these requirements trajectdifferentiation can satisfy to a certain degree.

The last product are handles to design an air sparging system. The applicability of air sparging is greatly determined by the degree in which air contacts the areas in the soil where it is needed. These question is normally answered by expert judgement or field tests. The handles offer an objective alternative.

HET PROJECT IMBITIE EN DRAINAGE

1.1 Inleiding

Voor u ligt het evaluatierapport van het project "Imbitie en drainage (I & D)". Dit rapport heeft tot doel de belangrijkste instrumenten te beschrijven die in het project zijn ontwikkeld. Deze producten zijn ontwikkeld naar aanleiding van opgedane kennis in andere vakgebieden.

De opgedane kennis (imbitie en drainage uit de mijnbouw en mengselgedrag uit de proces-technologie) onderschrijft drie essentiële knelpunten in de omgang met olieverontreinigingen:

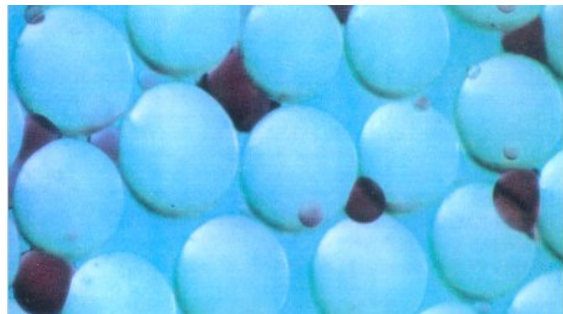
- Een olieverontreiniging komt voor een belangrijk deel in de bodem voor als puur product waarbij capillaire krachten de olie vasthouden (de bronzone), daarnaast verspreidt de olie zich in opgeloste vorm (pluimzone). Onderscheid tussen bron en pluimzone is essentieel om de toepasbaarheid van saneringstechnieken te bepalen.
- Ten gevolge van de aanwezigheid van olie als puur product wordt het emissiegedrag van oliecomponenten naar de pluim en onverzadigde zone in belangrijke mate bepaald door het mengselgedrag van deze olie.
- De opbouw van de bodem is complex. De problemen die dit veroorzaakt voor saneringstechnieken zijn afhankelijk van de toe te passen techniek. Heterogeniteit is daarmee een relatief begrip en moet worden gezien vanuit het saneringsperspectief.

In het project I & D is gewerkt aan producten om deze knelpunten beheersbaar te maken met als doel de verbetering van de positie van de in situ biodegradatievariant. Hierbij is gebruik gemaakt van de kennis die is opgedaan in andere vakgebieden. In het kader van het onderzoek zijn meerdere gedetailleerde deelrapportages geschreven waarin de opgedane kennis en ontwikkelde instrumenten worden beschreven. Het evaluatierapport laat de belangrijkste resultaten zien. Vier concrete eindproducten die breed toegepast kunnen worden in de hedendaagse sanering van met olie verontreinigde locaties. Vanzelfsprekend wordt hierbij voor verdergaande onderbouwing en toepassing verwezen naar de deelrapportages. In deze inleiding worden de vier producten geïntroduceerd, zodat een idee ontstaat waar het vervolg van het rapport over handelt.

1.2 Vier producten uit het I & D-project

Zonering

Het onderscheiden van bron en pluim is van belang om de toepasbaarheid van saneringstechnieken te bepalen. De bronzone bergt een relatief grote vracht olieproduct. Het gedrag van dit product wordt bepaald door in de bodem heersende capillaire krachten die het product op zijn plek houden. Het product bestaat uit een mengsel van oplosbare en onoplosbare en vluchtige en niet-vluchtige oliecomponenten. Saneringstechnieken in deze zone zullen gericht zijn op het verwijderen van vracht door het wegnemen van de capillaire bindingskrachten of op het wegnemen of reduceren van de emissie van vluchtige of oplosbare componenten naar de onverzadigde zone of pluim. De pluimzone bergt een relatief kleine vracht beter oplosbare oliecomponenten. Deze zijn al dan niet aëroob of anaëroob afbreekbaar.

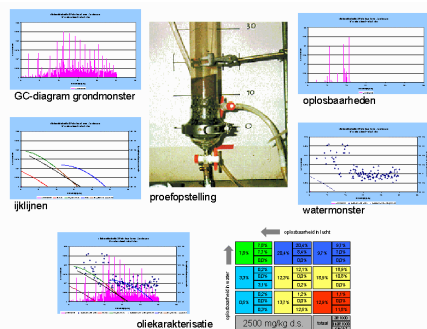


De componenten worden met het water getransporteerd en daarbij vertraagd door sorptie aan organisch materiaal en verminderd door biologische afbraak als de milieumomstandigheden daarvoor gunstig zijn. In deze zone zullen (biologische) saneringstechnieken gericht zijn op verwijdering van de verontreiniging of op vermindering van de in water opgeloste en gesorbeerde componenten tot een acceptabele en stabiele eindsituatie. Het spreekt voor zich dat daarbij aandacht moet worden besteed aan de bron waaruit de componenten afkomstig zijn.

Zonering is een verhandeling over methodieken om de bron van de pluimzone te onderscheiden. Hiervoor kunnen standaardtechnieken worden gebruikt, zoals olie-op-watertest, minerale olie-analyse, oliesondering en geurmetingen. In de studie is vastgesteld hoe met deze instrumenten een bronzone kan worden gevonden, wat de nauwkeurigheid van de technieken is, waar de omslagpunten liggen en welke techniek wanneer het best gebruikt kan worden.

Oliekarakterisatie

De toepasbaarheid van saneringstechnieken, risico's (humaan en ecologisch) en uitloging naar de pluim worden bepaald door eigenschappen van bodem en verontreiniging. Met name het bepalen van de eigenschappen van de olie in de bronzone speelt hierbij een belangrijke rol. De olie is aanwezig als mengsel van componenten die gezamenlijk het emissiegedrag van de pure olie bepalen. Om dit gedrag correct en objectief te voorspellen, moeten de fractie en eigenschappen van alle componenten in de olie bekend zijn. Dit is een onmogelijke opgave voor bestaande instrumenten. Vooral nog worden daarom subjectieve minder correcte alternatieven gehanteerd om het gedrag te voorspellen, met als gevolg een minder betrouwbare inschatting van risico's en saneringspotentie. Daarom is de oliekaracterisatie ontwikkeld. De oliekaracterisatie is een objectieve fingerprint van de specifieke eigenschappen van de aanwezige olie in een aangeleverd grondmonster.



Met de minerale oliefactor ('mo-factor') kan de fingerprint worden vertaald naar reeds uitgevoerde conventionele GC-analyses elders op de locatie. De olie-fingerprint kan, naast het inschatten van risico's en toepasbare saneringstechnieken, door zijn objectieve karakter ook worden gebruikt voor afspraken over saneringsresultaat, voortgangscontrole (ijkmomenten), urgentiebepaling, second opinion, afronding van sanering enzovoorts. Er zijn reeds vele oliekaracterisaties uitgevoerd op verschillende locaties voor verschillende doeleinden. De oliekaracterisatie is inmiddels als een gestandaardiseerd product op de markt verkrijgbaar.

Trajecdifferentiatie

Heterogeniteit is een begrip in de bodemsanering. Niet iedereen bedoelt hetzelfde. Een microbioloog denkt aan verschillende textuur op porieniveau, een geohydroloog aan ondoorlatende lagen, een persluchtmodelleur aan laagovergangen en een aannemer denkt aan bloopers. En de veldwerker? Die doet z'n best om leem van klei te onderscheiden. Trajecdifferentiatie is een objectieve statistische techniek om sondeergegevens geautomatiseerd te vertalen naar een dwarsprofiel met pakketten met eenzelfde eigenschap, zoals doorlatendheid of intreeweerstand. Daarbinnen worden lokale afwijkingen als 'laagjes' geïdentificeerd. Het resultaat is toegespitst op het toepassingsgebied. Voor de geohydroloog of bodemluchtonttrekkingsmodelleur kunnen pakketten met eenzelfde doorlatendheid worden aangegeven met een index voor slecht doorlatende laagjes (aantal, horizontale en verticale

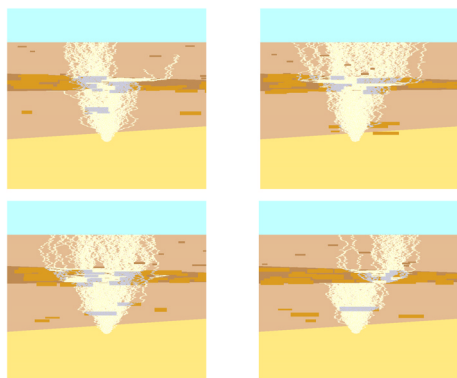


omvang).

Voor perslucht kunnen significante overgangen worden aangegeven en de mate waarin in een pakket horizontale storingen (andere intreeweerstand) aanwezig zijn.

Dimensioneringshandvatten voor persluchtinjectie

De toepasbaarheid van persluchtinjectie wordt bepaald door de vraag of injectielansen zo geplaatst kunnen worden dat de perslucht in voldoende mate terechtkomt op die plaatsen in de bodem waar ze ook terecht moet komen. Deze vraag wordt veelal beantwoord op basis van



'expert judgement' of een persluchtinjectieproef. De dimensioneringshandvatten bieden een objectief alternatief. De stroming van lucht door de bodem is erg gevoelig voor de aanwezigheid van gelaagdheden met afwijkende intreedruk en doorlatendheid. Deze informatie kan worden verkregen met trajectdifferentiatie. Het effect van de heterogeniteiten kan worden beoordeeld door simulaties uit te voeren met een random walkmodel. Het model visualiseert het effect van heterogeniteiten op het stromen van de lucht door een eenvoudige stochastische simulatie. Daarbij wordt een handvat gegeven hoe om te gaan met heterogeniteit. De relatie tussen de benodigde

intreedruk en het injectiedebiet kan worden afgeleid met kennis uit de procestechologie en grondmechanica. Alle kennis is gebundeld tot dimensioneringshandvatten voor het gebruik van persluchtinjectie.

1.3 **Verschenen rapportages**

Het project is uitgevoerd in de periode 1995 tot 2000. Het project is opgebouwd uit drie clusters: "Zonering", "Olie" en "Perslucht". In 1997 is een hoofdrapport van fase 1 uitgebracht. In het kader van fase 2 is het onderzoek in de clusters afzonderlijk beschreven in drie deelrapporten. In tabel 1 zijn de verschenen rapportages weergegeven.

Tabel 1. Deelrapportages.

deelrapport	datum
Eindrapportage fase 1	september 1997
Fase 2: Oliekarakterisatie	juli 1998
Fase 2: Zonering (inclusief trajectdifferentiatie)	juli 2000
Fase 2: Perslucht	juli 2000

HOOFDSTUK 2

ZONERING

2.1 Achtergrond

Een organische verontreiniging bestaat over het algemeen uit een bron (retentiezone) en een pluim (zie fig. 1). Voor de sanering van een olieverontreiniging is een onderscheid tussen bron en pluim essentieel. Beide zones vragen om een andere aanpak. Het identificeren van de bronnen en pluimen op de locatie is echter niet eenvoudig.

In de retentiezone is olie als afzonderlijke (pure) fase aanwezig. De olie kan als stromend product voorkomen of als niet-stromend, residuair product. Vanuit de retentiezone kunnen met name de beter oplosbare componenten zich met het grondwater of de bodemlucht verplaatsen tot buiten de zone waarin olie als pure fase aanwezig is. Er ontstaat een pluim. Hier treedt sorptie op aan bodemdeeltjes, waardoor de verontreiniging zich minder snel verplaatst dan het grondwater. Doelend op deze vertraging wordt deze zone ook wel aangeduid als retardatiezone.

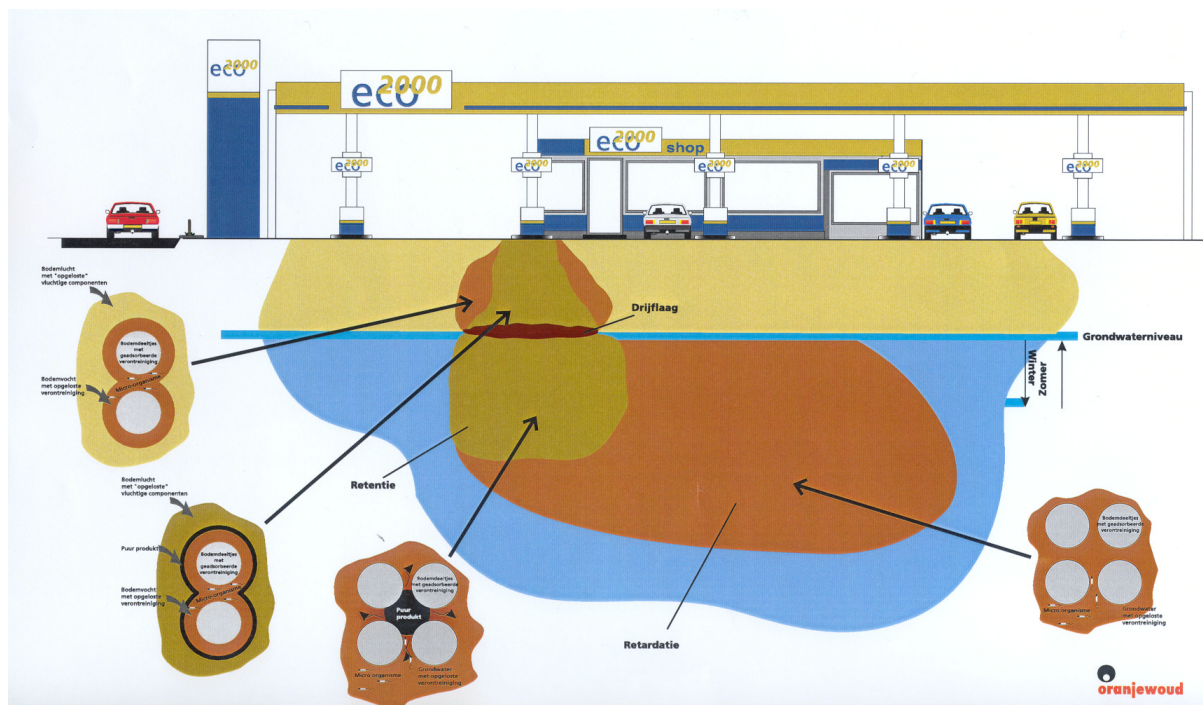


Fig. 1. Zones voor de karakterisering van een olieverontreiniging.

De meest bekende vorm van pure olie is de drijfslag. Drijfslagen verschillen van residuair product doordat de olie als een aaneengesloten fase voorkomt en in ieder geval in potentie vanuit zichzelf mobiel is. De olievezadiging in drijfslagen ligt grofweg tussen 30 en 80 % van het porievolume. Drijfslagen komen ter hoogte van de grondwaterspiegel voor. Nu moet hierbij niet worden gedacht aan een mooie centimeters dikke olielaag op een mooie vlakke grondwaterspiegel. Boven de waterspiegel bevindt zich een capillaire zone waarin vrijwel alle poriën nog gevuld zijn met water, hoe verder boven deze spiegel hoe meer gaten er in deze zone komen. Grote poriën bevatten geen water meer maar lucht, of in dit geval olie, kleine poriën bevatten nog water.

Wordt in een dergelijke situatie een 'snijdend filter' geplaatst dan kan dit worden opgevat als één hele grote porie, een hele grote depressie in de bovenzijde van de capillaire zone. De buis vult zich met olie tot het niveau waarin geen olie meer naar het punt kan stromen. Denk hierbij aan communicerende vaten. De dikte van de laag in de buis zegt daarom weinig over de dikte van de drijf laag, maar meer over de hoogte van de capillaire zone van zowel water als olie en over het feit dat er zoveel product kan toestromen. Er is gezegd product aanwezig dat vrij kan stromen en dit ook zal doen totdat hiervoor geen voldoende drukverschil meer bestaat. De drijf laag heeft de neiging zich zo plat mogelijk te maken. Daarmee vermindert de druk op de olie en kunnen de iets minder kleine poriën, waar de olie het water eerst nog weggedrukt had, zich weer vullen met water. Er ontstaan daardoor olielichaampjes die ingesloten zijn in de grote poriën. Deze olie kan niet meer stromen. Eenzelfde effect heeft de fluctuerende grondwaterspiegel. Hierdoor is onder de grondwaterspiegel sprake van een residuaire zone. Een karakteristieke lengte van residuaire oliedruppels ligt tussen één en tien poriediameters. De mate waarin residuaire olie in een bodemlaag achterblijft, hangt af van een groot aantal factoren. In het algemeen vertoont de restverzadiging een grote mate van ruimtelijke variatie op een locatie en ligt deze doorgaans tussen 2 en 30 % van het porievolume. In veel gevallen leidt dit proces van inkapseling tot het 'verdwijnen' van de drijf laag.

Ook boven de drijf laag, in de onverzadigde zone, bevindt zich residuaire olie. Dit is het grillige pad waarlangs de olie naar de grondwaterspiegel stroomt of is gestroomd. In de onverzadigde zone kunnen sterk waterhoudende lagen voorkomen die een capillaire barrière kunnen vormen voor stromende olie. Hierboven ontstaan dan minidrijf laagjes. Indien weinig olie is gemorst, beperkt de olieverontreiniging zich tot residuaire olie in de onverzadigde zone.

Het is moeilijk exact de lagen en paden aan te geven waarin de olie als residuaire product of als drijf laag aanwezig is. Doorgaans wordt dan ook het gebied dat beide zones omhult als bronzone omschreven. Hierin is de totale olieverzadiging dan navenant lager door 'verdunding' met bodemcompartimenten waarin feitelijk geen olie aanwezig is. Om de totale vracht olie in de poriën van de bodem te bepalen wordt een bulk-retentiecapaciteit van een bodem gedefinieerd als het volume aan olie dat is achtergebleven gedeeld door het totale volume van de bodem waarbinnen de verspreiding van de olie heeft plaatsgevonden. In bodems bedraagt de bulk-retentiecapaciteit doorgaans 0,25 tot 3 % van het porievolume, met lagere waarden naarmate de bodem sterker heterogeen is en de olie tot grotere diepte is doorgedrongen.

Voor de afweging van de geschiktheid van in situ technieken en het verder ontwerpen en dimensioneren, is het van groot belang bron en pluim te scheiden, waarbij de bron wordt opgedeeld in residuaire zones en drijf laag. Alleen voor die technieken waarmee getracht wordt intensief de bronzone te verwijderen is een inschatting van de totaal aanwezige vracht van belang. Voor technieken gericht op emissiereductie is de totale vracht niet van belang. Dan bepalen de emissieprocessen (eigenschappen van het oliemengsel en bodemaspecten) of een saneringstechniek toepasbaar is. Voor alle technieken is het onderscheid van bron en pluim essentieel. In de volgende paragrafen worden technieken aangedragen waarmee de bron in kaart kan worden gebracht.

2.2 Sonderingen met fluorescentieconus

Eén van de technieken om puur product aan te tonen is het gebruik van een fluorescentieconus (zie fig. 2). Dit is een sensor die ingebouwd is in sondeerapparatuur. In de fluorescentieconus is een UV-bron en een detectiesysteem verwerkt. De UV-bron pulseert licht met een instelbare golflengte door een saffierenvenster 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 (zie fig. 2).

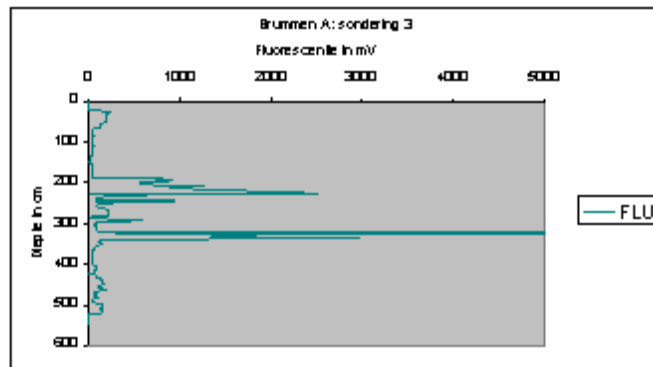


Fig. 2. Oliesonde en een oliefluorescentiediagram.

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. Kanttekeningen daarbij zijn dat:

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

De fluorescentieconus wordt toegepast in combinatie met een standaardsondeerconus (wrijvingsgetal en conusweerstand). Daardoor ontstaat inzicht in de variatie in bodemeigenschappen op het schaalniveau dat de verspreiding van olie bepaalt. Dit resulteert in onderscheid tussen residuaire zone en drijf laag en de verdeling van de olie in de residuaire zone.

De reproduceerbaarheid van metingen met de fluorescentiesonde lijkt redelijk maar is moeilijk te kwantificeren. De verschillen tussen de duplo metingen lijken vooral te worden bepaald door ruimtelijke heterogeniteit.

2.3 Boringen en olie-op-watertest

Een grondmonster wordt in een detectiepan ondergedompeld in water, waarna de vorming van een (olie)filmpje op het wateroppervlak wordt geregistreerd. Een positieve olie-op-waterreactie

duidt op de aanwezigheid van olie in het grondmonster en is daarmee indicatief voor de retentiezone. De techniek maakt echter geen onderscheid tussen de residuaire zone en de drijf laag.

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 de deelrapportage "Zonering".

De olie-op-waterreactie is al positief vanaf gehalten van circa 100 tot 300 mg/kg ds. Dit is weergegeven in figuur 3. Het betrekkelijk lage gehalte waarbij de olie-op-waterreactie al positief is, duidt erop dat olie vermoedelijk vaker in de vorm van oliedruppeltjes aanwezig is dan waarvan in de gangbare 'denkmodellen' wordt uitgegaan. Andersom kan worden geconcludeerd dat bij concentraties boven de 100 à 300 mg/kg ds in veel gevallen sprake is van een retentiezone. Daarmee kan ook de minerale olie-analyse worden gebruikt als techniek om de retentiezone in kaart te brengen.

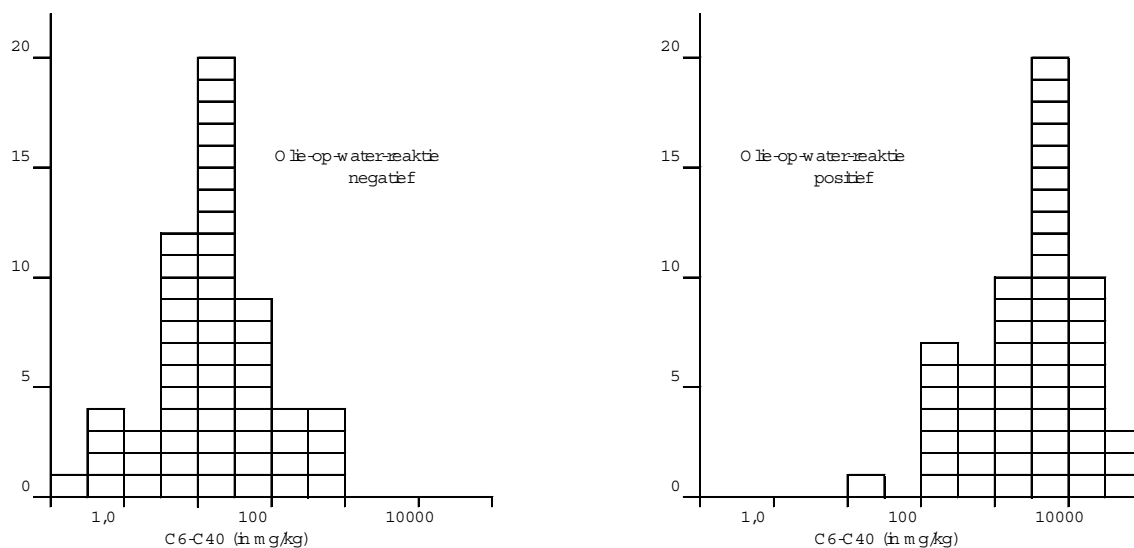


Fig. 3. Verdeling van het aantal monsters in de categorieën met en zonder olie-op-waterreactie naar het gehalte aan C₆ - C₄₀.

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 dient snel na het onderdompelen te worden beoordeeld of olie al dan niet aanwezig is, omdat de olie door vervluchtiging 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 van het bepalen van aanwezigheid van olie met de olie-op-watertest bedraagt circa 90 %.

De nauwkeurigheid waarmee de olie-op-watertest de retentiezone vaststelt, is afhankelijk van de meetdichtheid. Het grondmonster heeft doorgaans een grootte van enkele grammen en wordt veelal discontinu uit het bodemprofiel genomen. Aanbevolen wordt ten minste in iedere bodemlaag en/of 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.

2.4 Boringen en geurwaarnemingen

Geurwaarnemingen worden doorgaans geclassificeerd als 'geen', 'licht', 'matig' en 'sterk'. Dit lijkt een voordeel met het oog op het gewenste detail maar is het niet omdat geurwaarnemingen erg subjectief zijn. Matige en sterke benzine(achtige) geuren gaan gepaard met positieve olie-op-waterreacties en duiden op een bronzone. Een diesel(achtige) geur gaat altijd gepaard met een

positieve olie-op-waterreactie. De afwezigheid van geur impliceert echter niet dat er geen olie in de bodem aanwezig is. Geurwaarnemingen hebben dan ook een vrij slechte, algemene relatie met het minerale oliegehalte in de grond. Deze relatie moet per locatie, en veelal per bodemlaag, afzonderlijk worden vastgesteld. De matige relatie voor twee, tamelijk identieke olieverontreinigingen (benzine) in twee overeenkomstige bodems (zand) is weergegeven in figuur 4.

Met name vanwege het gebrek aan detail en de onduidelijke relatie tussen geurwaarnemingen en de aanwezigheid als oliefase, is de waarde van geurwaarnemingen voor het in kaart brengen van puur product zeer beperkt. Daarnaast moet het gebruik bij nieuw uit te voeren onderzoek uit oogpunt van arbeidshygiëne worden afgeraden. De methode dient derhalve vooral ter ondersteuning bij de interpretatie van 'oude' onderzoeksgegevens, waarbij vooral onthouden moet worden dat ook zonder positieve zintuiglijke waarneming puur product aanwezig kan zijn. Een positieve zintuiglijke waarneming kan met redelijke zekerheid worden beschouwd als indicatie voor de aanwezigheid van puur product.

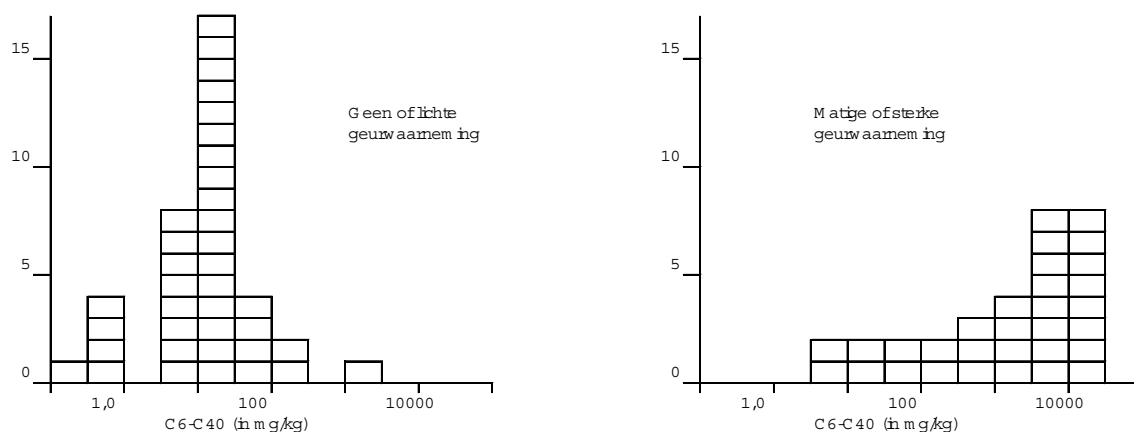


Fig. 4. Verdeling van het aantal monsters in de categorieën met 'geen of lichte geuren' en met 'matige of sterke geuren' naar het gehalte aan C₆ - C₄₀ op twee locaties met een benzineverontreiniging.

2.5 Toepassingsgebied

Voor de beoordeling van de geschiktheid van een saneringstechniek en/of voor het ontwerpen van een optimale saneringsvariant en het bepalen van risico's is altijd een beeld van de omvang en de aard van de verontreinigingsbron nodig. Onderzochte methodieken geven hiervoor een onderbouwd handvat.

De olie-op-watertest is een subjectieve visuele waarneming. In de praktijk levert de beoordeling echter weinig discussie op. Bij benzine moet er snel na het onderdompelen worden beoordeeld omdat een eventueel gevormd filmpje door vervluchtiging ook weer snel kan verdwijnen. Daarnaast bestaat het risico van storing door humusachtige verbindingen. In de praktijk levert de subjectieve beoordeling van geurwaarnemingen de meeste discussie op. Geurwaarnemingen worden niet alleen bepaald door de aanwezigheid van olie, geven geen beeld van gehalten en worden om arbeidshygiënische redenen afgeraden. Het gehalte minerale olie wordt bepaald door het olieproduct. Bij de ene olie is bij 100 mg/kg ds sprake van pure olie bij een andere bij 300 mg/kg ds. Daarnaast kan een humeuze bodem een hoger gehalte leveren (achtergrondwaarde). Fluorescentiemetingen kunnen worden beïnvloed door de aanwezigheid van organische stof en/of humuszuren.

Bovendien kan de mate waarin fluorescerende structuren in olie voorkomen sterk variëren, waardoor de relatie tussen de mate van de verontreiniging en fluorescentie niet altijd eenduidig is.

De belangrijkste randvoorwaarde is het begrip dat de methodieken iets zeggen over de bulk, niet over de kwaliteit. De nauwkeurigheid, waarmee de bronzone wordt vastgesteld, hangt naast de betrouwbaarheid van de methodiek af van de meetdichtheid.

De kosten voor olie-op-watertests zijn nihil, want deze worden over het algemeen meegenomen bij een standaard nader onderzoek. Dit is tevens de kracht van de methodiek. Belangrijke informatie voor weinig geld. Minerale olie-analyses zijn eveneens onderdeel van het nader onderzoek. Ze leveren echter geen kwaliteitsaspecten van de olie. Daarvoor moet een oliekaracterisatie worden uitgevoerd. De kosten voor het uitvoeren van fluorescentiesonderingen op een locatie bedragen, bij een aantal van 30 per locatie tot een diepte van 4 à 5 m-mv, circa *f* 65,00 - *f* 85,00 per meter.

HOOFDSTUK 3

OLIEKARAKTERISATIE

3.1 Achtergrond

Een organische verontreiniging bestaat uit een bron en een pluim. In de bron is de olie aanwezig als pure fase (mengsel van honderden oliecomponenten). Uit het vorige hoofdstuk blijkt dat bij een grondverontreiniging met olie vrijwel altijd sprake is van een bronzone. Uit de olie lossen langzaam de beter oplosbare componenten op in langsstromend water en lucht. Het bepalen van de risico's en het ontwerpen van een (biologische) in situ sanering voor een olieverontreiniging wordt bemoeilijkt door gebrek aan informatie over het oplosgedrag van de olie. Olie is een complex mengsel van aromaten, alkanen en andere koolwaterstoffen. De eigenschappen van deze stoffen gezamenlijk bepalen de eigenschappen van het oliemengsel.

Het vaststellen van de eigenschappen van het oliemengsel is niet mogelijk met bestaande analysetechnieken. De gangbare minerale olieanalyse is een bulkanalyse en geeft derhalve geen inzicht in de moleculaire samenstelling. Daarbij komt dat de minerale olieanalyse niet representatief is voor de hoeveelheid aanwezige olie. Olie bevat vaak ook componenten die buiten het meetbereik van deze bulkanalyse vallen. Met name in benzine kan deze fractie zeer groot zijn (tot meer dan 90 %!). Een aanvullende analyse op vluchtige olie lijkt dan wellicht een oplossing, maar ook deze bulkanalyse gaat voorbij aan de essentie, namelijk het vaststellen van de eigenschappen.

Is dan wellicht het koppelen van de eigenschappen van de verontreiniging aan het type product (benzine, diesel) een oplossing? Ook 'pure producten' vertonen echter al een grote diversiteit (zie fig. 5), mede doordat zij over de jaren heen vaak van samenstelling zijn veranderd. Bovendien brengt een dergelijke karakterisatie niet de diversiteit in beeld die het gevolg is van verschillen in de aard en de duur van 'verouderingsprocessen' in de bodem.

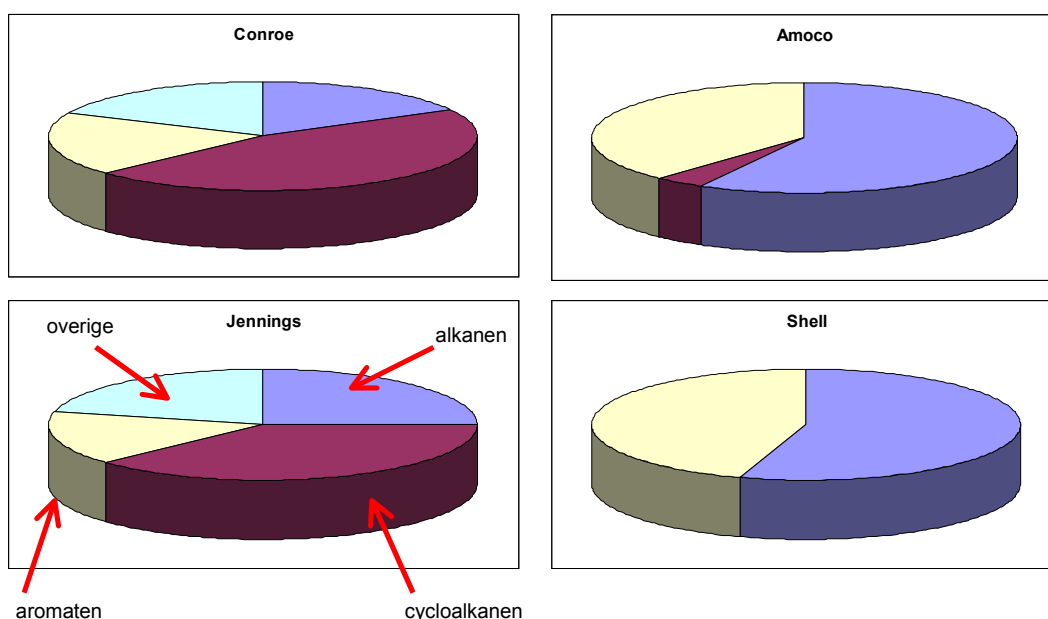


Fig. 5. Samenstelling van vier 'benzines' naar stofgroepen.

Wat overblijft is de inschatting van een deskundige: subjectieve 'expert judgement'. Input voor de deskundige is een minerale olie-analyse en BTEX-analyse. In enkele gevallen zijn ook de lichtere oliefracties bepaald (analyse olie vluchtig). In beginsel zou de specifieke samenstelling van een olie op een locatie met behulp van gaschromatografie/massaspectrometrie kunnen worden ontrafeld. Dit lost echter niet het probleem op dat van de aldus gedetermineerde stoffen veelal geen stofgegevens bekend zijn en het gedrag van de olie als geheel derhalve nog steeds niet kan worden beschreven en voorspeld. Daarbij is algemeen bekend dat een dergelijke analyse zeer kostbaar is. Er rest de deskundige geen ander alternatief dan zich een beeld te vormen van de olie aan de hand van het gaschromatogram. De differentiatie, die de deskundige in deze benadering kan aanbrengen, is beperkt tot een indeling naar retentietijd en manifesteert zich bijvoorbeeld in de gangbare presentatie van een gehalte aan olie in vier fracties: $C_{10} - C_{12}$, $C_{12} - C_{22}$, $C_{22} - C_{30}$ en $C_{30} - C_{40}$. In grote lijnen geldt de eerste fractie daarbij als goed stripbaar en uitspoelbaar, de tweede fractie als matig stripbaar en uitspoelbaar en de beide laatste fracties als niet stripbaar en uitspoelbaar. Voor het gemak wordt ervan uitgegaan dat alle oliecomponenten aëroob afbreekbaar zijn. Risico's worden op gelijke wijze beoordeeld: de eerste fractie vertegenwoordigt enig risico, de tweede minder risico en de beide laatste vrijwel geen risico. Risicobeschouwingen met als input een minerale olie-analyse worden overigens nauwelijks uitgevoerd. Veelal wordt volstaan met een beschouwing van gesuggereerde maatgevende componenten, zoals benzeen of één van de andere vluchtige aromaten.

Voor een inschatting van het werkelijke gedrag van olie tijdens een sanering of van de werkelijke risico's en uitlogingsvoorspellingen vóór of ná de sanering zijn vrijwel alle benaderingen niet afdoende. Vragen als "Hoeveel olie kan ik via strippen of grondwateronttrekking kwijt raken?", "Hoeveel breekt er af?" en "Wat houd ik naar verwachting over en wat zijn daarvan de risico's?" worden in beginsel met het beschikbare instrumentarium niet beantwoord. Er is behoefte aan een objectief instrument dat een relatie legt tussen de eigenschappen van de olie en de bulkparameter minerale olie.

3.2 Oliekarakterisatie

Vanwege de beperkingen van de gangbare bepaling aan minerale olie is in dit onderzoek de oliekaracterisatie ontwikkeld. De oliekaracterisatie is beschreven in de deelrapportage "Oliekaracterisatie".

De oliekaracterisatie is een uitbreiding van de gangbare gaschromatografische analyse van minerale olie. Behalve in de massafracties van de afzonderlijke componenten geeft de oliekaracterisatie echter ook inzicht in de oplosbaarheid van deze componenten in water en lucht en is de oliekaracterisatie in staat de stofgroep aan te geven waartoe de afzonderlijke componenten behoren. Doordat de stofeigenschappen in beginsel van alle componenten worden bepaald, is de oliekaracterisatie ook in staat het mengselgedrag van olie te beschrijven. De stofgroepidentificatie maakt een inschatting mogelijk van de afbreekbaarheid van de olie en van de risico's ervan. De 'oliekaracterisatie' neemt in beginsel alle oliecomponenten in haar beoordeling mee en wordt alleen beperkt door het noodzakelijke gebruik van een extractiemiddel, waardoor alleen componenten met kleinere retentietijden dan die van n-hexaan (C_6) niet meetbaar zijn.

Het principe van de oliekaracterisatie is weergegeven in figuur 6. Een grondmonster uit de bronzone (zie hoofdstuk 2) wordt gesplitst in twee gedeelten waarna het ene deel gaschromatografisch wordt onderzocht (1) en het andere deel in evenwicht wordt gebracht met water (2). Belangrijk hierin is dat emulsievorming wordt voorkomen. Het evenwichtswater wordt vervolgens eveneens gaschromatografisch geanalyseerd (3).

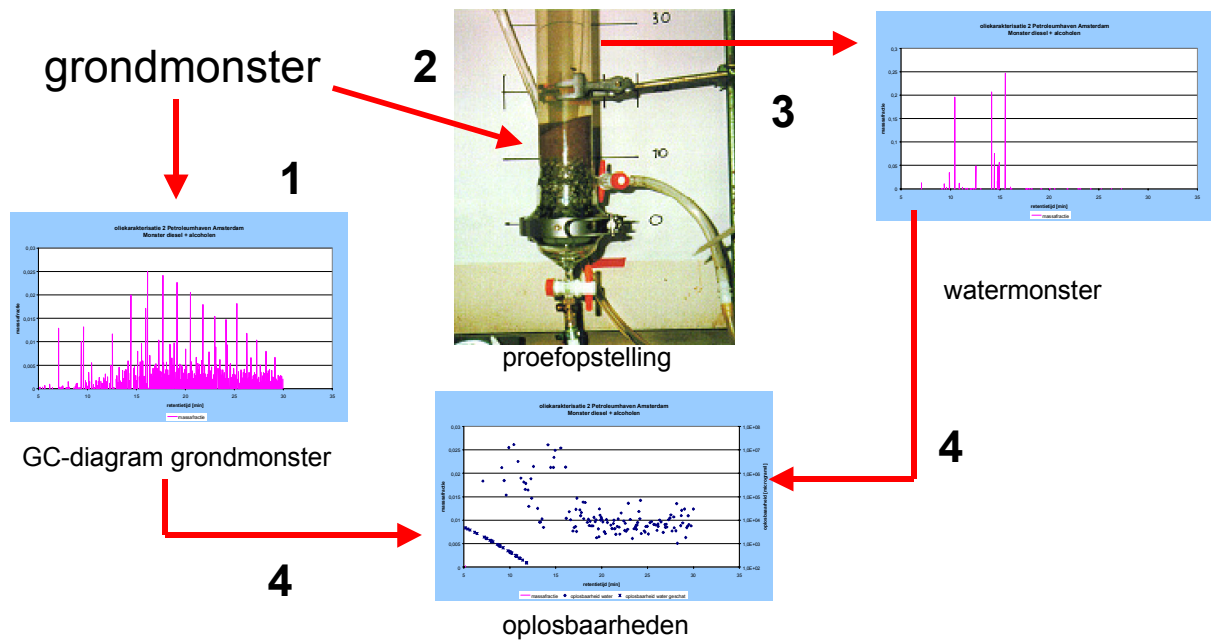


Fig. 6. Principe van de oliekaracterisatie.

Gaschromatografie berust op scheiding op basis van het kookpunt. Omdat het kookpunt van een stof direct gerelateerd is aan de verzadigde dampspanning, kan uit de retentietijd (kookpunt) en een ijklijn van stoffen met een bekende verzadigde dampspanning én een bekende retentietijd de verzadigde dampspanning van elke stof in het chromatogram van de oliefase (het grondmonster) worden berekend. Wanneer de verzadigde dampspanning bekend is, is ook de oplosbaarheid in lucht bekend.

Volgens de Wet van Raoult geldt dat de concentratie van een stof in de waterfase gelijk is aan het product van zijn wateroplosbaarheid en zijn molfractie in de oliefase. Onder de aanname dat de retentietijd van een stof bij beide gaschromatografische analyses (bij benadering) gelijk is, kunnen de gaschromatogrammen van de oliefase en de waterfase aan elkaar worden gekoppeld (4) en kan de wateroplosbaarheid van elke stof in het chromatogram van de waterfase worden berekend.

De resultaten van de oliekaracterisatie ten aanzien van de oplosbaarheden in lucht (verzadigde dampspanning) en water worden weergegeven in een diagram als van figuur 7. Voor deze presentatie zijn de stoffen zowel naar hun oplosbaarheid in lucht als in water ingedeeld in drie categorieën, te weten 'goed', 'matig' en 'slecht' oplosbaar. De categoriegrenzen zijn arbitrair maar ingegeven vanuit de saneringspraktijk dat stoffen met een oplosbaarheid groter dan xyleen als 'goed' oplosbaar gelden en dat stoffen met een oplosbaarheid kleiner dan 3-ring-PAK (anthra-ceen) als 'slecht' oplosbaar gelden.

De massafractie aan stoffen met een goede oplosbaarheid in lucht is weergegeven in de linker-kolom, met een matige oplosbaarheid in lucht in de middelste kolom en met een slechte oplosbaarheid in lucht in de rechterkolom. Evenzo is de massafractie aan stoffen met een goede oplosbaarheid in water weergegeven in de bovenste rij, met een matige oplosbaarheid in water in de middelste rij en met een slechte oplosbaarheid in water in de onderste rij.

Uit het diagram kan zo eenvoudig de massafractie worden afgelezen van de olie die in potentie door middel van strippen (oplosbaar in lucht) of uitspoelen (oplosbaar in water) kan worden verwijderd.

Zo representeert het vak 'linksboven' de componenten die zowel goed oplosbaar zijn in lucht als water. De vermelde percentages en fracties representeren een deel van de vracht die onder in de tabel is aangegeven. Onderin is tevens een 'mo-factor' opgenomen om de eigenschappen te vertalen naar conventionele analyses. De performance van saneringstechnieken is terug te voeren naar eigenschappen. Als 75 % van een olie zeer vluchtig is, heeft een techniek als bodemluchtextractie of persluchtinjectie een hoog rendement.

De kleur van de vakken geeft aan of in potentie risico's of emissies van de betreffende categorie te verwachten zijn. Rood is daarbij een indicatie voor risico's voor de mens door uitdamping, blauw is een indicatie voor de uitloging naar de pluim.

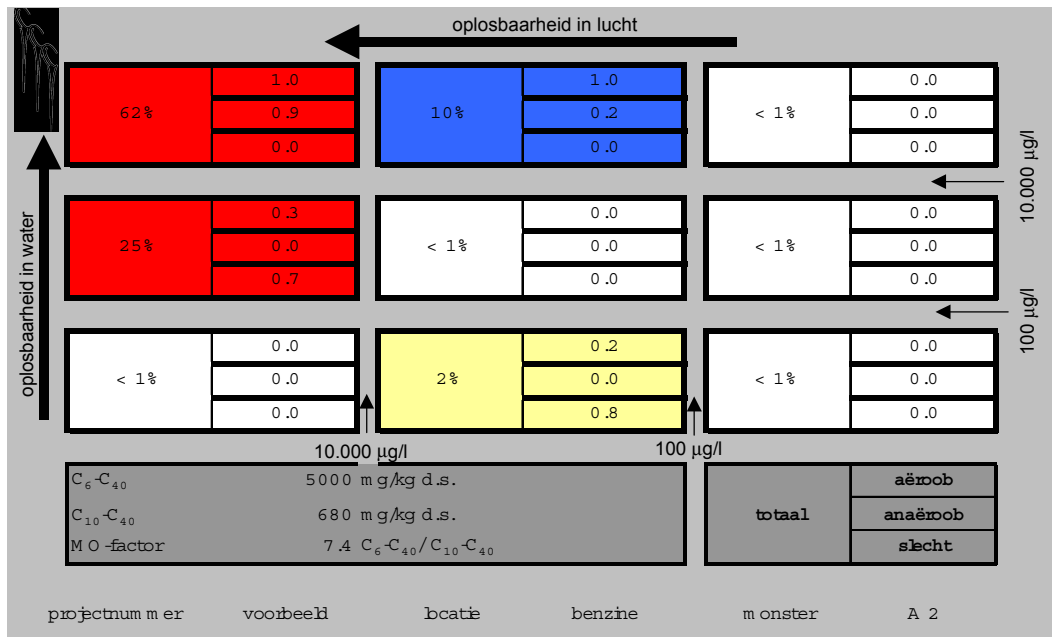


Fig. 7. Presentatie van de oliekarakterisatie.

Naast de potentiële stripbaarheid en uitspoelbaarheid is in het diagram van figuur 7 ook de potentiële afbreekbaarheid onder aërobe en anaërobe omstandigheden aangegeven. Per vak is de fractie weergegeven die potentieel aëroob of anaëroob afbreekbaar is. Dit gegeven berust op de mogelijkheid om aan de hand van de oplosbaarheid in lucht en water de stofgroep te identificeren waartoe de oliecomponent naar meeste waarschijnlijkheid behoort. TEX en andere benzeen-isomeren en geoxideerde koolwaterstoffen gelden daarbij als (ook) anaëroob afbreekbaar, n-alkanen, fenylalkanen en lichte PAK gelden als uitsluitend aëroob afbreekbaar.

De stofgroepindeling is gebaseerd op het feit dat weliswaar geen relatie bestaat tussen de wateroplosbaarheid van oliecomponenten in het algemeen en hun retentietijd, maar dat deze relatie wél bestaat voor de afzonderlijke stofgroepen in de olie. Deze relaties zijn afgeleid voor 135 stoffen met bekende wateroplosbaarheid en retentietijd (of kookpunt) en weergegeven in figuur 8.

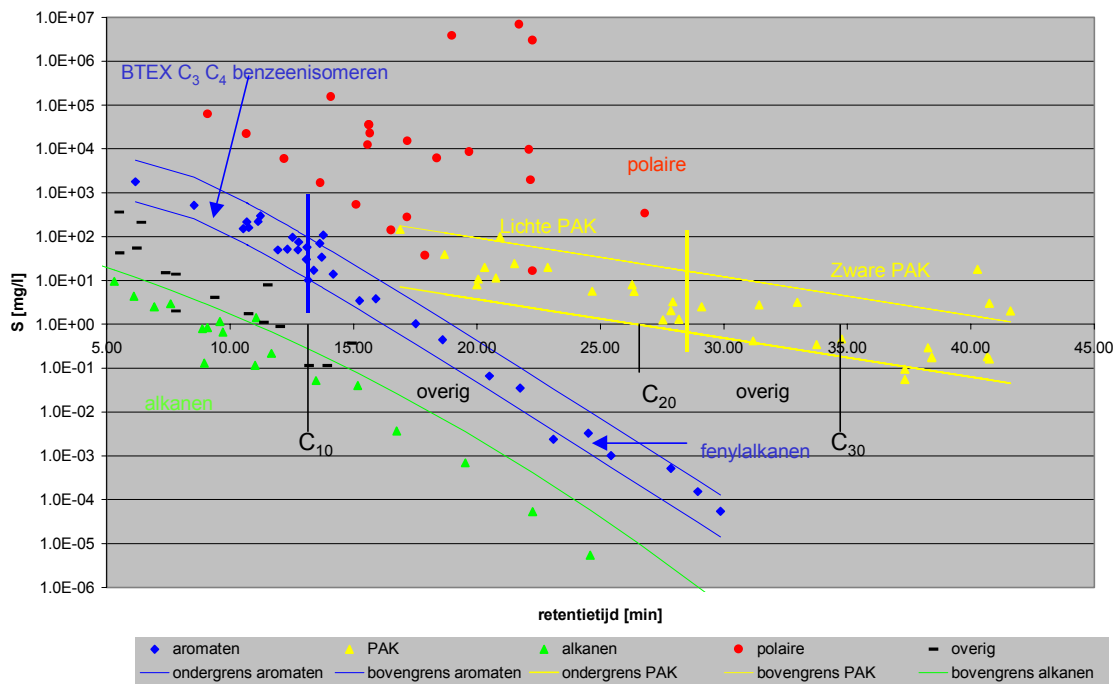


Fig. 8. Indeling van oliecomponenten op basis van retentietijd (oplosbaarheid in lucht) en oplosbaarheid in water.

3.3 Toepassingsgebied

De oliekaracterisatie kan worden beschouwd als een fingerprint. Deze fingerprint kan, naast het inschatten van risico's en toepasbare saneringstechnieken, ook worden gebruikt voor afspraken over saneringsresultaat, voortgangscontrole (ijkmomenten), urgentiebepaling, second opinion, afronding van sanering enzovoorts. In tabel 2 zijn toepassingsgebieden vertaald naar de gebruikers en de fase waarin een project zich bevindt.

Tabel 2. Toepassingsgebieden voor oliekaracterisatie.

	bevoegd gezag	adviesburo	aannemer	probleembezitter
nader onderzoek	vaststellen van urgentie incl. ecotox. risico's	vaststellen van urgentie incl. ecotox. risico's		vaststellen van urgentie incl. ecotox. risico's
saneringsonderzoek	<ul style="list-style-type: none"> - beoordeling van saneringstechnieken - stripbaar - uitspoelbaar - afbreekbaar - risico's - kosteneffectief - vaststellen van saneringsdoelstelling 	<ul style="list-style-type: none"> - afweging van saneringstechnieken - stripbaar - uitspoelbaar - afbreekbaar - risico's - kosteneffectief - beoordeling van haalbaarheid van saneringsdoelstelling 	<ul style="list-style-type: none"> - afweging van saneringstechnieken - stripbaar - uitspoelbaar - afbreekbaar - risico's - kosteneffectief - beoordeling van haalbaarheid van saneringsdoelstelling 	<ul style="list-style-type: none"> - zekerheid van werking van technieken - beoordeling van haalbaarheid van saneringsdoelstelling
saneringsplan	beoordeling van ontwerp	ontwerp dimensionering	ontwerp dimensionering	
bestek		monitoringsinstrument (bijv. prestatiebestek)	nagaan van alternatieven	
monitoring	controle van instrument	voortgang borgen	controle van instrument	inzicht in voortgang
afsluiting van sanering	controle van saneringsdoelstelling	onderbouwd kunnen afsluiten	onderbouwd kunnen afsluiten	controle van saneringsdoelstelling
troubleshooting	genereren van oplossingsrichting bij 'falend' ontwerp	toetsen en aanpassen van ontwerp	toetsen en aanpassen van ontwerp en systeem	inzicht in probleem

De oliekaracterisatie heeft een duidelijke toegevoegde waarde voor meerdere toepassingsgebieden, waarbij de objectiviteit en reproduceerbaarheid van de methodiek een sterke troef zijn. De methodiek sluit goed aan op de BeVer-ideeën, zoals verwoord in "van trechter naar zeef", door een directe technische invulling van het begrip stabiele eindsituatie en het bieden van een technisch instrument ter controle van de sanering op de zogenaamde 'ijkmomenten'. De methodiek is toepasbaar voor alle organische verontreinigingen.

De oliekaracterisatie bepaalt de eigenschappen van de olie. Naast deze gegevens zijn voor een goede risico-evaluatie en bepaling van toepasbare saneringstechnieken de eigenschappen van de bodem medebepalend.

Indien op een locatie meerdere brongebieden aanwezig zijn, wordt geadviseerd per bron een karakterisatie uit te voeren wanneer de bronnen veroorzaakt lijken door verschillende producten. De eigenschappen van de olie kunnen worden vertaald naar conventionele minerale olieanalyses in zo'n bron door toepassing van een 'mo-factor'.

Van ieder te onderzoeken grondmonster moet minimaal 400 gram grond worden geleverd met een gehalte van minimaal 1000 mg/kg ds aan olie. Voor de zekerheid wordt aanbevolen om twee monsterpotten per te onderzoeken monster aan te leveren. De rapportage kan in overleg worden toegespitst op andere toepassing.

De oliekaracterisatie is sinds 1998 in gebruik. Inmiddels zijn er circa 50 oliekaracterisaties uitgevoerd voor 40 verschillende locaties.

De reproduceerbaarheid is onderzocht door de oliekaracterisatie van drie grondmonsters in duplo uit te voeren. Geconcludeerd wordt dat de reproduceerbaarheid van de oliekaracterisatie schommelt rond de 80 %. De fouten die zijn gemaakt in de analyse worden niet noemenswaardig vergroot door bewerking van de gegevens.

De kosten voor een oliekaracterisatie bedragen f 2.850,00 per stuk (exclusief BTW). Handling van de monsters tot en met aanlevering aan het laboratorium is voor rekening van de opdrachtgever. Indien de karakterisatie voor monitoringsdoeleinden wordt gebruikt, of indien er meerdere karakterisaties per locatie moeten worden uitgevoerd, is een reductie van kosten mogelijk.

HOOFDSTUK 4

TRAJECTDIFFERENTIATIE

4.1 Achtergrond

De toepasbaarheid van saneringstechnieken voor de aanpak van een locatie verontreinigd met olie wordt bepaald door twee zaken. De interactie van de saneringstechniek met de verontreiniging (zie hoofdstuk 3) en de interactie met de bodem. In het algemeen zijn bodems met veel 'lage doorlatendheidsmaterialen', zoals klei en leem, minder geschikt voor toepassing van in situ technieken. Deze zijn meer geschikt in beter doorlatende bodems met zand en grind waar een meer homogene doorstroming met water of lucht mogelijk is en waardoorheen grotere fluxen kunnen worden gerealiseerd. Voor toepassing van in situ technieken is dus primair de aard van de verschillende bodemlagen van belang (grondsoortclassificatie).

Op de meeste locaties bestaat de bodem uit een groot aantal verschillende materialen die op verschillende wijze ten opzichte van elkaar zijn gerangschikt. Er is sprake van een heterogene bodem. Heterogeniteit is echter schaalafhankelijk. Op gebiedsniveau kan een laag als 'klei' worden gekarakteriseerd. Op locatieniveau blijkt de ene klei de andere niet te zijn en binnen de kleilaag zijn weer allerlei verschillen aanwezig. Dat kan de meer of mindere aanwezigheid zijn van gelaagdheden, die bestaan uit afwijkende grondsoorten zoals zand, maar ook de aanwezigheid van meer of minder kalk, organische stof, van grotere of juist kleinere poriën tussen de kleideeltjes of de opbouw in meer kubische dan wel in meer plaatvormige structuren. Stelregel is dat naarmate binnen een gebied op kleinere schaal, dus meer in detail, naar de bodem wordt gekeken, de heterogeniteit groter is. Bij het inschatten van de invloed van de heterogeniteit van de bodem op het rendement van een sanering moet daarom de schaal worden beschouwd van het proces volgens welke de sanering verloopt. Deze heterogeniteit is locatiespecifiek en is in belangrijke mate bepalend voor de mate waarin water of lucht in contact gebracht kan worden met de olieverontreiniging en daarmee voor het succes van de in situ techniek. Voor toepassing van in situ technieken is dus secundair ook de heterogeniteit van de onderscheiden bodemlagen van belang.

Het vaststellen van de aard en opeenvolging van bodemlagen is traditioneel onderwerp van bodemkundig onderzoek. Aandachtspunt is echter de schaal waarop inzicht in de bodemopbouw van belang is. Gangbare karteringsmethoden (boringen) zijn er niet op gericht verschillen in bodemkwaliteit vast te stellen op een schaalniveau dat aansluit op de vraag vanuit saneringstechnieken.

4.2 Trajectdifferentiatie

Voor het gedetailleerd in kaart brengen van de bodemopbouw ten behoeve van saneringstechnieken zijn sondeergegevens bij uitstek geschikt. Naast het inzicht in de aard (grondsoort) en de volgorde van de bodemlagen bieden sondering ook inzicht in de variabiliteit daarin op het schaalniveau dat voor een saneringstechniek als bijvoorbeeld perslucht van belang is. Traditioneel uitgevoerde sonderingen leveren gegevens over de conusweerstand en het wrijvingsgetal van de bodem. Metingen worden langs de verticaal uitgevoerd en doorgaans per centimeter geregistreerd. De meetresultaten vormen in beginsel (continue) getallenreeksen die via statistische rekentechnieken kunnen worden verwerkt en geïnterpreteerd. Statistische technieken hebben als voordeel dat zij in hoge mate objectief en reproduceerbaar zijn en grotendeels geautomatiseerd kunnen worden.

Een combinatie van statistische technieken voor de verwerking van sondeergegevens heeft geleid tot de techniek van de trajectdifferentiatie. Bij trajectdifferentiatie wordt door middel van een 'split-moving window methode' gezocht naar de meest significante overgangen in een gegevensreeks. Deze overgangen corresponderen met laagovergangen op basis waarvan een sondeerreeks wordt ingedeeld in trajecten. Omdat sondeergegevens doorgaans uit twee gegevensreeksen bestaan, conusweerstand en wrijvingsgetal, worden beide reeksen eerst samengevoegd tot één nieuwe gegevensreeks. Dit wordt gedaan door een zogenaamde 'principal component analyse' die ervoor zorgdraagt dat bij de samenvoeging zo min mogelijk informatie uit de beide afzonderlijke reeksen verloren gaat.

Nadat de indeling heeft plaatsgevonden, wordt ieder traject gekarakteriseerd aan de hand van de gemiddelde conusweerstand en het gemiddelde wrijvingsgetal. De aard (grondsoort) van de onderscheiden trajecten kan dan worden afgelezen in een grondsoortclassificatiediagram. Een dergelijk diagram is weergegeven in figuur 9.

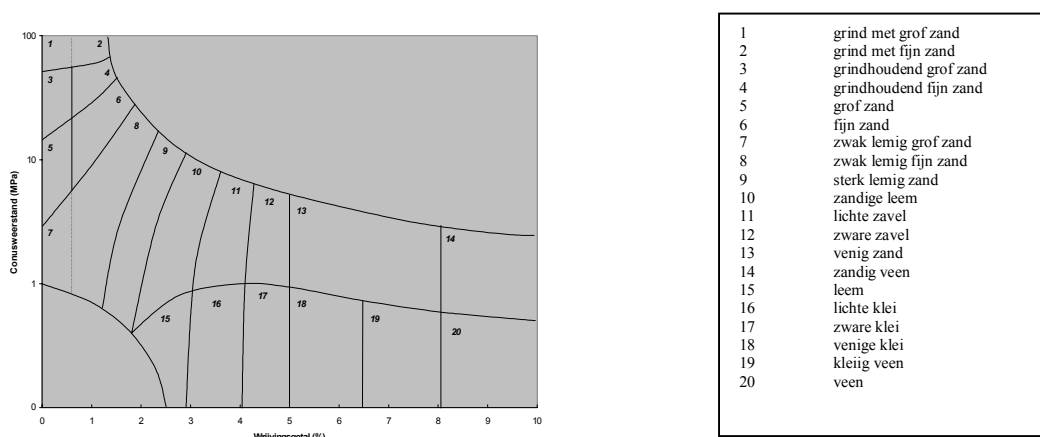


Fig. 9. Karakterisering van trajecten op basis van gemiddelde conusweerstand en wrijvingsgetallen.

Door het combineren van meerdere sonderingen met de interpretatietechniek van trajectdifferentiatie is een techniek ontstaan om sondeergegevens geautomatiseerd te vertalen naar een dwarsprofiel met pakketten met eenzelfde eigenschap. Daarbinnen worden lokale afwijkingen als 'laagjes' geïdentificeerd. De resultaten van de toepassing van trajectdifferentiatie op de sondeergegevens van een locatie zijn vermeld in tabel 3 en weergegeven in figuur 10 op basis van per grondsoort afgeleide grootheden, zoals doorlatendheid en intreedruk.

Tabel 3. 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	

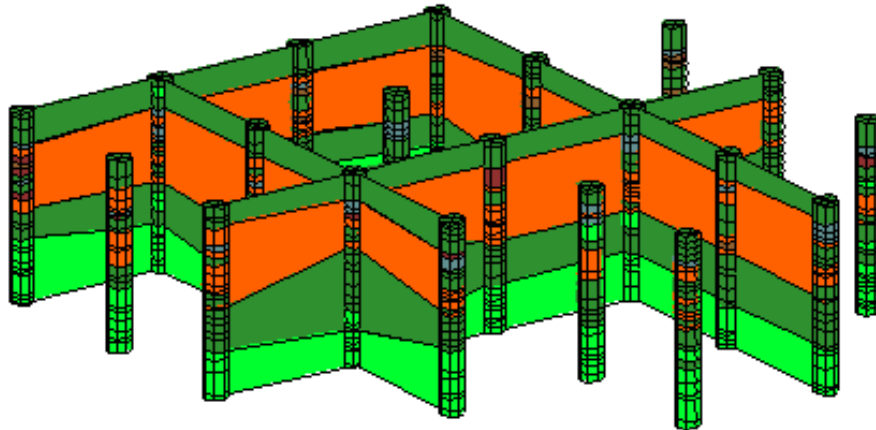


Fig. 10. Driedimensionale weergave van een door middel van trajectdifferentiatie uitgevoerde bodemschematisatie voor de toepassing van perslucht.

Intreedruk en doorlatendheid staan beide in relatie met de grondsoort en kunnen daaruit worden geschat. Het voordeel van deze methode is dat op relatief eenvoudige en goedkope wijze een beeld van de intreedruk en de doorlatendheid ontstaat op het detailniveau, zoals dat voor de bodemopbouw in grondsoorten is bereikt. Het nadeel is dat gebruik moet worden gemaakt van algemene relaties tussen de betreffende eigenschappen en de grondsoort. Een nadeel is bovendien dat in de grondsoortclassificatie op basis van sondeergegevens een potentiële foutenbron zit.

Intreedruk

In de deelrapportage "Perslucht" zijn voor de meest gangbare in Nederland voorkomende grondsoorten $P_c S_w$ -curven (vochtkarakteristieken) opgenomen die kunnen worden gebruikt om de intreedruk en de relatie tussen druk en waterverzadiging van bodemlagen te schatten.

De vochtkarakteristiek heeft een geleidelijk verloop en er is daarom niet een eenduidige druk waaronder geen en waarboven alle poriën luchtgevuuld zijn. Er wordt gesteld 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 luchtgevuuld te krijgen (P_{c2} tot P_{c30}). De gedachte achter een minimaal benodigd luchtgevuuld porievolume is dat alleen bij een minimale luchtverzadiging de kans voldoende groot is dat de luchtgevuulde poriën een aangesloten luchtbaan vormen waardoor de lucht door de laag kan ontsnappen. Een overzicht van geschikte P_c -waarden voor het inschatten van de intreedruk van bodemlagen is gegeven in tabel 4.

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.

Tabel 4. Intreedruk (mbar).

code	grondsoort	P _c -waarde	geïntervieweerde 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	kleiig veen	P _{c30}	4669	-	3000	5000
20	veen	P _{c30}	-	493	400	800

Doorlatendheid

Voor dezelfde grondsoorten als waarvoor intreedrukken zijn gegeven in tabel 4, zijn ook gegevens over de horizontale doorlatendheid geïntervieweerd. Een overzicht van deze waarden is gegeven in tabel 5.

Tabel 5. Horizontale doorlatendheid (m/dag).

code	grondsoort	geïntervieweerde 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	kleiig veen	-	-	0,01	0,05
20	veen	-	0,053	0,02	0,1

Vergelijking van beide waarden (Bodemkaart en Rijtema) 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.

Vooralsnog 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.

4.3 Toepassingsgebied

Het resultaat van trajectdifferentiatie is toegespitst op het toepassingsgebied. Voor de geohydroloog of bodemluchtonttrekkingsmodelleur kunnen pakketten met eenzelfde doorlatendheid worden aangegeven met een index voor slecht doorlatende laagjes (aantal, horizontale en verticale omvang). Voor perslucht kunnen significante overgangen worden aangegeven en de mate waarin in een pakket horizontale storingen (andere intreeweerstand) aanwezig zijn. Bij het gebruik van de oliesonde (bijvoorbeeld FFD-conus) worden de olielaagjes geïdentificeerd tezamen met bodemlagen, waardoor de stroming van olie wordt gefrustreerd. Voor de grondmechanicus kunnen zettingsgevoelige pakketten en laagjes worden geïdentificeerd. Allemaal belangrijke aspecten vanuit het saneringsperspectief waarbij de wirwar van heterogeniteitsaspecten is teruggebracht tot de essentiële input.

De resultaten, zoals die in tabel 3 zijn weergegeven, kunnen worden gebruikt om een model van de bodemopbouw te genereren waarbij onzekerheden omtrent de exacte ligging en afmetingen van heterogeniteiten stochastisch zijn verwerkt. Een dergelijk model voor de toepassing van perslucht is beschreven in de deelrapportage "Perslucht". Dit model is bedoeld om in de loop van het ontwerp- en dimensioneringsproces inzicht te verkrijgen in de voorspelbaarheid van het gedrag van perslucht in de bodem. Daartoe wordt een zogenaamde Monte Carlo-simulatie uitgevoerd. Hierin wordt een groot aantal malen een 'random' bodemschematisatie uitgevoerd, waarna aspecten van het persluchtgedrag worden bestudeerd.

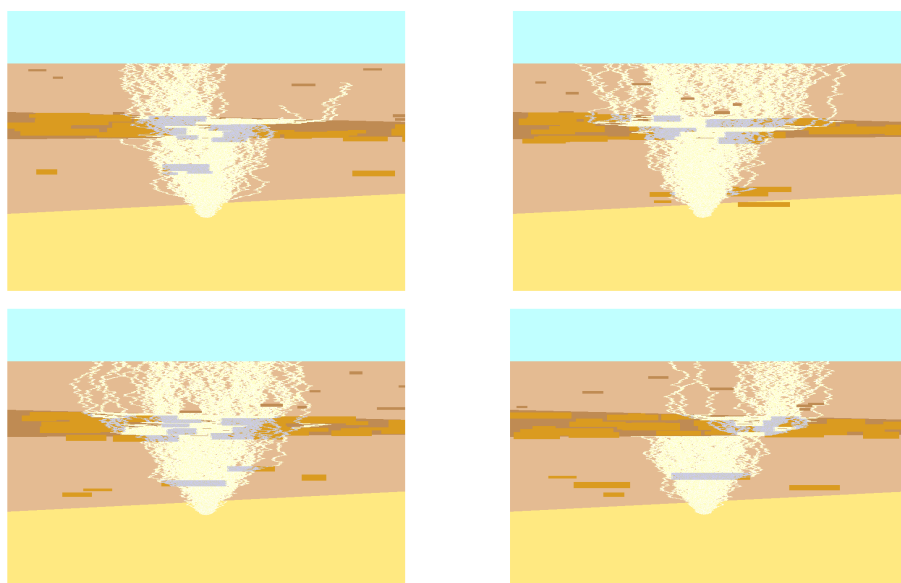


Fig. 11. Resultaten van vier simulaties van het doorstromen van een bodem met perslucht.

De mate waarin de uitkomsten van de afzonderlijke schematisaties overeenkomen dan wel verschillen, geeft dan een indruk van de gevoeligheid van het gedrag van perslucht voor de heterogeniteit van de bodem. De uitkomsten van een viertal simulaties is weergegeven in figuur 11. Uit figuur 11 blijkt dat de resultaten van de vier simulaties op deze locatie (Deventer B) nogal verschillen. Persluchtinjectie levert op deze locatie derhalve de nodige risico's met betrekking tot het saneringsresultaat.

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 de saneringstechniek relevante bodemkenmerken (bijvoorbeeld intreedruk en doorlatendheid) uit de grondsoort kunnen worden afgeleid. Het verdient daarom veruit de voorkeur om op een locatie ook steeds enkele boringen uit te voeren om ten minste de grondsoortclassificatie te ondersteunen.

Ten opzichte van sonderingen kennen boringen twee voordelen en drie nadelen:

1. Het eerste voordeel is dat boringen gemakkelijk kunnen worden gecombineerd met monsterneming en zintuiglijke beoordeling. Sondeerapparatuur kan weliswaar worden uitgerust met steekbusapparatuur, maar de toepassing is bewerkelijk en daardoor relatief duur. Monsterneming leidt bovendien tot het ontbreken van de sondeergegevens in het bemonsterde traject.
2. Een tweede voordeel van boringen is dat de interpretatie geen gebruik hoeft te maken van de mogelijk niet altijd juiste relatie tussen conusweerstand en wrijvingsgetal enerzijds en grondsoort anderzijds (zie fig. 9). In verband hiermee is het bij het gebruik van sondeertechnieken zeer wenselijk ook enkele boringen uit te voeren om de vertaalslag van sondeergegevens naar grondsoorten goed te kunnen maken.
3. In het tweede voordeel van boringen ligt direct ook een nadeel, namelijk dat de grondsoortbenoeming, afhankelijk van de kwaliteiten van de (veld)bodemkundige, slechts een nominale karakterisering oplevert in zand, zwak lemig zand, sterk lemig zand, lichte zavel, en dergelijke. Hierin komen nuances mogelijk onvoldoende aan bod.
4. Het belangrijkste nadeel van boringen is dat zij niet het vereiste inzicht in gelaagdheden opleveren zoals dat wél met sonderingen wordt verkregen. Kleine gelaagdheden worden versmeerd. Een uitzondering hierop vormen Begemanboringen. Dergelijke boringen zijn wellicht zelfs beter dan sonderingen maar zijn doorgaans te duur om daarmee een gehele locatie in kaart te brengen.
5. Het derde nadeel is dat boringen in sterkere mate het bodemprofiel verstoren dan sonderingen en daardoor eerder voorkeursbanen creëren. Zolang persluchtinjectie als saneringsoptie wordt overwogen, moeten boorgaten daarom steeds zorgvuldig met bentoniet worden afgedicht.

In veel situaties zijn locaties in het verleden reeds door middel van boringen onderzocht. Zeker in de beginfase van het afwegingsproces of persluchtinjectie een potentieel toepasbare techniek is, zal dan gebruik worden gemaakt van de gegevens zoals die hieruit naar voren zijn gekomen. Het indelen van de bodem in (grotere) lagen zal daarbij doorgaans geen problemen opleveren. Het onderkennen van kleinere gelaagdheden is mogelijk wél een probleem evenals het inschatten van de heterogeniteit. Dit dient dan op basis van aannamen of ervaring te gebeuren.

DIMENSIONERINGSHANDVATTEN VOOR PERSLUCHTINJECTIE

5.1 Achtergrond

Nadat de verontreinigingssituatie voldoende in kaart is gebracht, het te saneren geval bekend is en besloten is te gaan saneren, begint het denken aan oplossingen. Volgens de nieuwe richtlijnen moet dat denken gericht zijn op het functioneel saneren van de bovengrond en het kosten-effectief verwijderen van de verontreiniging in de ondergrond om tot een stabiele eindsituatie te komen.

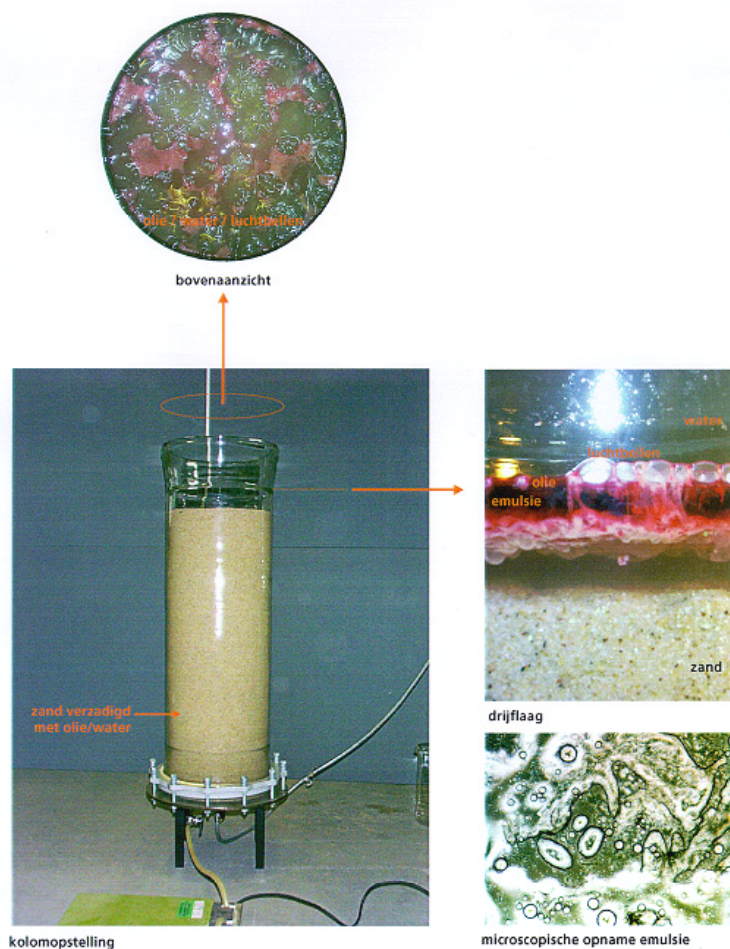
Wanneer de pluim van een olieverontreiniging zich slechts zeer beperkt verspreidt en de gehalten in de pluim acceptabel blijven, behoort een volledig extensieve saneringsvariant (NA = Natuurlijke Afbraak) tot de mogelijkheden. In een dergelijke variant wordt feitelijk alleen gemonitord of de verspreiding inderdaad beperkt blijft en of de gehalten inderdaad verlagen. Indien dit onvoldoende het geval is, is een meer intensieve aanpak noodzakelijk, waarbij met name de aanpak van de bron een belangrijke rol zal spelen.

Een overzicht van saneringstechnieken, die voor de sanering van de bronzone in aanmerking komen, zijn weergegeven in tabel 6. Hierin zijn tevens een aantal karakteristieken aangegeven op basis waarvan in het eerste ontwerpstadium van het saneringsproces een keuze kan worden gemaakt van potentieel toepasbare technieken. Het gaat hierbij om kostenaspecten van implementatie en exploitatie, tijd, energie- en waterverbruik en de belasting van het overige milieu. Daarnaast spelen onderzoekskosten een rol. Deze hangen grotendeels samen met de mate van detail waarin de bodem en de olie in kaart moeten worden gebracht. Tenslotte kan niet iedere techniek in ieder type bodem of voor ieder type olieverontreiniging worden ingezet. Dit is aangegeven onder 'beperkingen'.

Tabel 6. Overzicht van saneringstechnieken.

ontwerp	karakteristieken										
	implementatiekosten	exploitatiekosten	tijd	energieverbruik	watervbruik	emissies andere milieus	ligging bron	omvang bron	bodemopbouw	aard van de olie	beperkingen
ontgraven	hoog	laag	kort	beperkt	beperkt	groot	detail	detail	grof	grof	terreininrichting
grondwater onttrekken	matig	hoog	lang	hoog	hoog	groot	detail	grof	grof	detail	waterdoorlatendheid
bodemluchtextractie	matig	hoog	beperkt	hoog	geen	groot	detail	grof	grof	detail	luchtdoorlatendheid
persluchtinjectie	matig	matig	beperkt	hoog	geen	groot	grof	grof	detail	detail	intreedruk, luchtdoorlatendheid, heterogeniteit
reactieve schermen	hoog	laag	eeuwig	laag	geen	geen	grof	grof	grof	detail	zuurstofconcentratie, redoxtoestand
natuurlijke afbraak	laag	laag	eeuwig	geen	geen	geen	grof	grof	grof	detail	zuurstofconcentratie, redoxtoestand

Uit tabel 6 blijkt dat de toepassing van een saneringstechniek altijd voor- en nadelen heeft. Toch neemt persluchtinjectie een bijzondere plaats in door de saneringspotentie bij olieverontreini-



gemaakt van expert judgement zonder duidelijk objectief kader.

Fig. 12. Verdringing van olie door perslucht.

5.2 Dimensioneringshandvatten voor persluchtinjectie

Aansluitend op de nevendoelelstelling van het project "Imbitie en drainage" is tijdens het project steeds met een schuin oog gekeken naar de informatie die nodig is om te komen tot ontwerp- en dimensioneringshandvatten voor persluchtinjectie. Met behulp van deze handvatten moet in de ontwerp- en dimensioneringsfase van een sanering kunnen worden aangegeven of perslucht in de bodem kan worden ingebracht, of deze lucht de plekken in de bodem bereikt waar dat gewenst is, en zo ja, met welke druk en debiet, in hoeveel filters op welke diepte moet worden geïnjecteerd. Deze vragen worden in de gangbare praktijk nog veelal beantwoord op basis van 'expert judgement' of een persluchtinjectieproef. De ontwikkelde handvatten bieden hiervoor een aantrekkelijk alternatief. De handvatten bestaan uit:

- Intreedruk-crackingdiagrammen die aangeven welke druk bij persluchtinjectie minimaal en maximaal moet en mag worden gerealiseerd.
- Een simulatieprogramma waarmee aansluitend op een bodemkarakterisering, zoals die met trajectdifferentiatie wordt bereikt, inzicht wordt verkregen in de invloed van bodemheterogeniteit op de voorspelbaarheid van stromingsgedrag van persluchtinjectie.
- Van Genuchten-krommen en Q_h -diagrammen waaruit per grondsoort inzicht wordt verkregen in de relaties tussen druk, debiet en luchtverzadiging.

gingen. Perslucht kan worden ingezet als techniek om vluchtige componenten uit de oliebron te strippen, hetgeen bij met name lichtere olieproducten tot een aanzienlijke vrachtreductie leidt. Daarnaast of vervolgens kan perslucht worden ingezet als zuurstofdonor voor de aërobe afbraak van in water oplosbare olieproducten. Door deze twee toepassingsmogelijkheden kan perslucht als saneringstechniek vrijwel alle emissies uit een oliebron wegnemen. Een derde positieve eigenschap van perslucht, die binnen het I & D-project is aangetoond, is het vermogen van perslucht om residuair olie uit de verzadigde zone naar de grondwaterspiegel te verdringen (zie fig. 12 en deelrapport "Perslucht"). Probleem bij de toepassing van perslucht is de beschikbaarheid van de benodigde kennis voor het inschatten van de toepasbaarheid van de techniek en de verdere dimensionering tot saneringsvariant. Vooralnog wordt hierbij vooral gebruik

De ontwikkelde handvatten zijn in wezen een vertaling van de complexe theorie van imbibitie en drainage in een praktisch stroomschema. Het doorlopen van het stroomschema maakt het mogelijk om met enkele simpele berekeningen en vuistregels, een sterk visueel maar eenvoudig simulatieprogramma en enkele grondsoort gerelateerde diagrammen verantwoorde beslissingen te nemen. Het stroomschema is weergegeven in figuur 13.

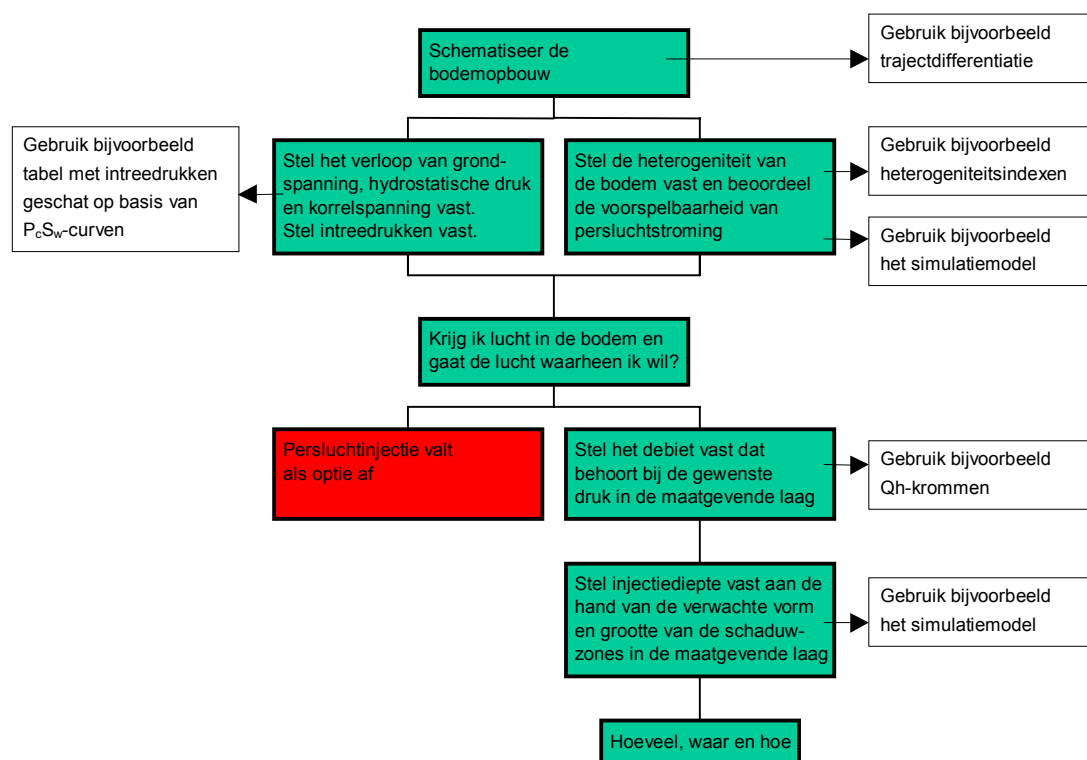


Fig. 13. Stroomschema voor het ontwerp en de dimensionering van een persluchtinjectie.

De stroming van lucht door de bodem is erg gevoelig voor de aanwezigheid van gelaagdheden met afwijkende intreedruk en doorlatendheid. Om hierin inzicht te krijgen wordt eerst een schematisatie van de bodemopbouw opgesteld. Deze moet inzicht leveren in zowel de aard van de aanwezige lagen als in de heterogeniteit daarin. Met name voor het verkrijgen van inzicht in de heterogeniteit zijn sondeergegevens en de uitwerking daarvan met trajectdifferentiatie zeer geschikt.

Aan de hand van de bodemopbouw wordt vervolgens een intreedruk-crackingdiagram opgesteld met daarin het verloop van de grondspanning, de hydrostatische druk en de minimale injectiedruk. Het diagram beantwoordt de primaire vraag of perslucht in de bodem kan worden geïnjecteerd. Dat wil zeggen dat in de maatgevende laag een overdruk moet kunnen worden gerealiseerd die groter is dan de intreedruk maar kleiner dan de horizontale crackingdruk. Indien dit niet het geval is, is persluchtinjectie op de locatie niet toepasbaar.

Het effect van de heterogeniteiten kan worden beoordeeld door simulaties uit te voeren met een random walkmodel. Het simulatieprogramma visualiseert het effect van heterogeniteiten op het stromen van de lucht in afzonderlijke simulaties (zie fig. 11). Door deze een groot aantal malen te herhalen, waarbij steeds een nieuwe, stochastische verdeling van de heterogeniteiten in bodemlagen wordt gecreëerd, ontstaat inzicht in het gemiddelde luchtstromingsgedrag en de variatie daarin.

Indien deze variatie groot is, is het doorstromen van de bodem blijkbaar erg gevoelig voor de exacte, maar onbekende ligging van de heterogeniteiten en is het resultaat van injectie dus erg onzeker. Persluchtinjectie is dan minder geschikt.

Druk, debiet en luchtverzadiging kunnen alleen in onderlinge samenhang worden beoordeeld. Bij gelijkblijvend debiet blijkt de druk van de lucht in de bodem echter slechts in zeer geringe mate te variëren. De ingewikkelde relaties tussen debiet, druk en luchtverzadiging kunnen met behulp van de Wet van Ergun worden afgeleid uit Van Genuchten-krommen en Qh-diagrammen. Iteratieberekeningen geven aan dat dit in de praktijk tot een zeer eenvoudig handvat leidt, namelijk dat de injectiedruk alleen groter moet zijn dan de intreedruk en kleiner moet zijn dan de crackingdruk in alle bodemlagen tussen het injectiepunt en de verontreiniging.

De minimale en maximale drukken kunnen eenvoudig worden afgelezen uit de eerder opgestelde intreedruk-crackingdiagrammen. Het bij deze druk behorende debiet en de bij deze druk behorende luchtverzadiging kunnen vervolgens worden afgelezen uit de per grondsoort opgestelde Van Genuchten-krommen en Qh-diagrammen.

Met behulp van het inzicht in de laagsgewijze bodemopbouw en de aan grondsoort gerelateerde intreedrukken kunnen intreedruk-crackingdiagrammen worden geconstrueerd. Deze zijn van belang bij het ontwerp en de dimensionering van een persluchtinjectie. De constructie van intreedruk-crackingdiagrammen is uitgebreid beschreven in het deelrapport "Perslucht". Een voorbeeld van een intreedruk-crackingdiagram is gepresenteerd in figuur 14.

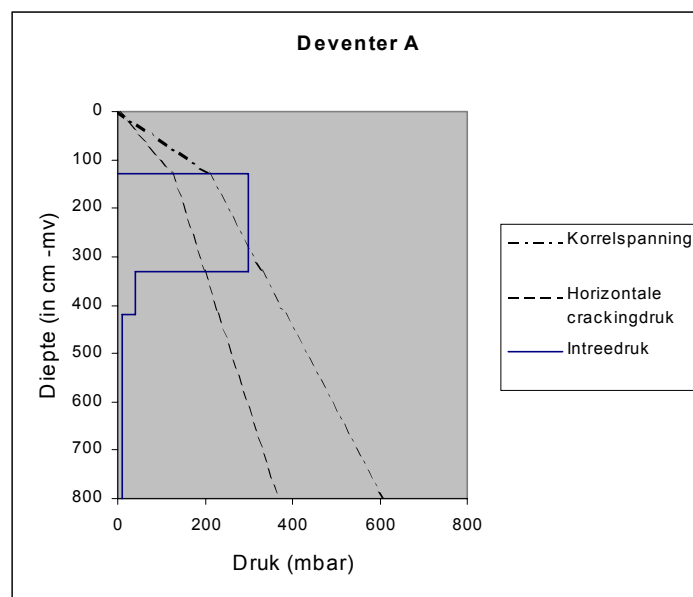


Fig. 14. Intreedruk-crackingdiagram.

Aan de hand van het diagram kan de primaire vraag worden beantwoord of persluchtinjectie mogelijk is. Dat wil zeggen dat in de maatgevende laag een overdruk moet kunnen worden gerealiseerd die groter is dan de intreedruk maar kleiner dan de horizontale crackingdruk. Indien dit niet het geval is, is persluchtinjectie op de locatie niet toepasbaar.

Behalve bij het opstellen van intreedruk-crackingdiagrammen is de grondsoortidentificatie van bodemlagen de basis voor het selecteren van een geschikte combinatie van een Van Genuchten-kromme en een Qh-diagram. Hiermee kan het effect van de ingewikkelde relaties

tussen debiet, druk en luchtverzadiging voor het specifieke bodemsysteem nader worden ingevuld. Een voorbeeld van een dergelijke combinatie is gegeven in figuur 15.

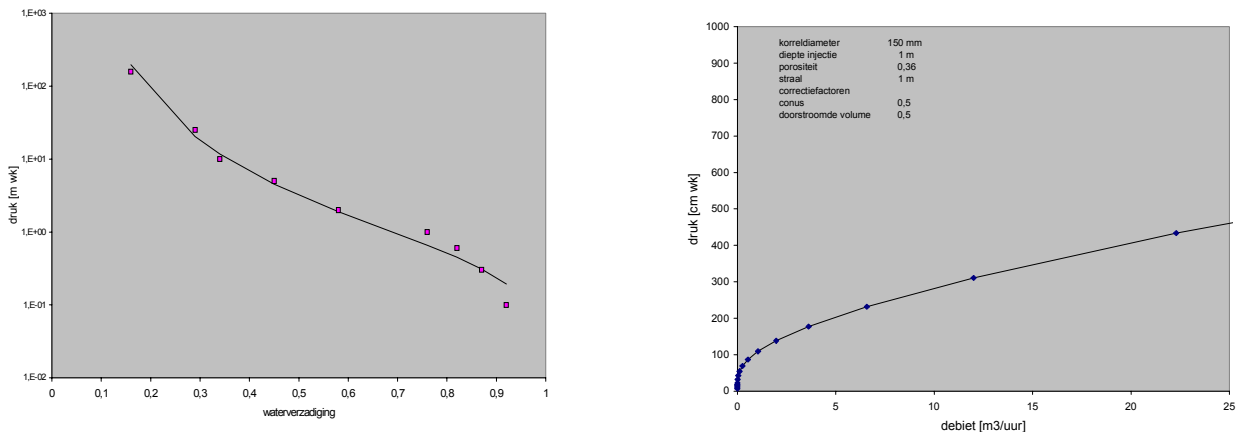


Fig. 15. Van Genuchten-kromme en Qh-kromme voor sterk lemig zand.

5.3 Toepassingsgebied

Met behulp van de dimensioneringshandvatten kan in de ontwerp- of dimensioneringsfase van een sanering worden aangegeven of perslucht in de bodem kan worden ingebracht, of deze lucht de plekken in de bodem bereikt waar het gewenst is, en zo ja, met welke druk en debiet, in hoeveel filters op welke diepte moet worden geïnjecteerd.

Voor het schematiseren van de bodemopbouw zijn boorgegevens en/of sondeergevens van de locatie noodzakelijk. Sondeergegevens verdienen de voorkeur gezien de hoge verticale resolutie (cm-schaal).

Het is aan te raden het simulatieprogramma ten minste een tiental malen uit te voeren om voldoende idee van het heterogeniteitseffect te verkrijgen.

Schattingen van de intreedruk en van de complexe relaties tussen druk en debiet zijn in de handvatten uitgewerkt als Qh-krommen. Veelal volstaan deze in het ontwerpstadium. Indien in het dimensioneringsstadium echter alsnog een nauwkeuriger schatting noodzakelijk is - hiervoor zijn uitgangspunten in de handvatten opgenomen - moet een Qh-kromme worden opgesteld door middel van een persluchtinjectieproef. Met name voor het begintraject van de Qh-kromme is het daarbij van belang dat een debietmeter wordt gebruikt waarmee kleine debieten nauwkeurig kunnen worden gemeten.

De handvatten bepalen de toepasbaarheid van perslucht vanuit het perspectief van de bodem. Voor succesvol gebruik van perslucht is ook kennis over de verontreiniging nodig. Is de verontreiniging wel vluchtig of aëroob afbreekbaar? Voor sommige verontreinigingen is dit eenvoudig. Voor olieachtige verontreinigingen moet een oliekaracterisatie worden uitgevoerd, waaruit dan tevens de verwachting ten aanzien van de eventuele restverontreiniging blijkt.

De handvatten zijn klaar voor gebruik en getoetst door kritische reviewers. Voor de makers is het belangrijkste operationeel aspect de ervaringen van de gebruikers. De handvatten moeten als eenduidig, helder en makkelijk toepasbaar worden ervaren.

De handvatten zijn een instrument ter ondersteuning van adviseurs. De rapportage "Perslucht", waarin de handvatten staan verwoord, en het simulatieprogramma zijn vrij toegankelijk. De kosten zijn daarmee gekoppeld aan adviesuren. De handvatten zijn vanzelfsprekend bedoeld om deze uren te verkorten. De benodigde veldinput is zoveel mogelijk gericht op conventionele, vaak al uitgevoerde veldwerktechnieken of een geringe aanvulling daarop. Ook hier zijn de meerkosten, uitgaande van een goede adviseur, gering. Om de kosten van een sanering in de hand te houden, is een persluchtproef een must wanneer de dimensionering anders op te veel onzekerheden zou berusten. Deze kosten moeten worden afgewogen tegen de reductie van de faalkans bij implementatie.



Fig. 16. Persluchtinjectieproef met weggedrukte injectie- en monitoringsfilters. Rechts 'foutieve monitoring' met behulp van een conventionele peilbuis.