

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: Perslucht

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. G.H.M.J. van der Sterren (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: Perslucht", 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: Air sparging", 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: Perslucht

CUR/NOBIS rapportnummer

95-2-02

Project rapportnummer

95-2-02 fase 2

Auteur(s)

ir. K.R. Weytingh
ir. P.O. de Vries
ir. G.H.M.J. van der Sterren

Aantal bladzijden

Rapport: 44
Bijlagen: 36

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

Om de toepasbaarheid van persluchtinjectie als saneringsvariant te kunnen beoordelen, moet bij het ontwerp en bij de dimensionering van de sanering worden aangegeven of perslucht in de bodem kan worden ingebracht, of deze lucht de plekken in de bodem bereikt waar een saneringseffect nodig is, en zo ja, met welke druk en debiet op welke diepte moet worden geïnjecteerd. De stroming van lucht door de bodem is erg gevoelig voor de aanwezigheid van gelaagdheden met afwijkende intreedruk en doorlatendheid. De gevoeligheid uit zich in de mate van dispersie, in het ontstaan van schaduwzones en in de gerichtheid van de luchtstroming. De mate van dispersie hangt af van de aard van de bodem op porieschaalniveau. Schaduwzones en gerichtheid van de luchtstroming ontstaan door heterogeniteit van de bodem op groter schaalniveau. Het effect van de heterogeniteiten kan in de vorm van een kansverdeling worden aangegeven. Het effect van de heterogeniteit kan in grote lijnen worden beoordeeld door de heterogeniteitsindexen in te voeren in een random walkmodel. Druk, debiet, luchtverzadiging en invloedsgebied kunnen alleen in onderlinge samenhang worden beoordeeld. Dit kan gebeuren via een iteratieproces. Uit iteratieberekeningen blijkt dat bij gelijkblijvend debiet de druk van de lucht in de bodem slechts in zeer geringe mate varieert. In de praktijk leidt dit tot een zeer eenvoudig dimensioneringshandvat, namelijk dat bij persluchtinjectie een druk moet worden aangelegd die slechts weinig groter is dan de druk die voor een bepaalde luchtverzadiging en debiet in een bovenliggende laag wordt gewenst. Deze druk moet alleen groter zijn dan de intreedruk en kleiner zijn dan de crackingdruk in alle bodemlagen tussen de injectiediepte en de diepte waarop de verontreiniging zich bevindt. In kritische situaties kan meer zekerheid worden verkregen door een persluchtinjectieproef uit te voeren.

Trefwoorden**Gecontroleerde termen:**

doorlatendheid, fysische eigenschappen, geomorfologie, persluchtapparatuur

Vrije trefwoorden:

heterogeniteit, injectiedebiet, injectiedruk, intreeweerstand, meerfasenstroming

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: Air sparging

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
ir. G.H.M.J. van der Sterren

Number of pages

Report: 44

Appendices: 36

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

In order to evaluate the applicability of air sparging as a potential remediation technique for oil polluted soils, several aspects of the soil must be known. Answer must be given to the question whether compressed air can be injected into the soil, whether this air reaches the spots in the soil that need a remediation effect, and if so, what pressure and flow rate should be maintained in how many filters and at which depth. Flow of air through soil is very sensitive to the presence of layers or heterogeneities with different entry pressures and air permeabilities. This manifests in dispersivity, shadow zones and directedness of air flow. The extend of dispersivity depends on soil structure at pore level. Shadow zones and directedness are related to heterogeneity at a somewhat larger scale. Because of the random character of heterogeneities also the occurrence of shadow zones and the directedness of (preferential) flow can only be described as probability functions. Therefore heterogeneity indexes are proposed. These indexes can be used in a random walk model which describes the stochastic character of air flow through more or less heterogeneous soils. Pressure, flow rate, air saturation and area of influence can only be evaluated with respect to each other, for example within an iteration process. Calculations for a variety of soils show that at constant flow rate air pressure only drops to a very small extend with decreasing depth. Air sparging therefore needs only an injection pressure that is a little bit greater than the pressure which is needed to achieve the desired air saturation or flow rate in the most critical layer. Next to that this pressure must be greater than entry pressure and lesser than cracking pressure of all the layers between the injection layer and the layer in which the pollution is situated. In critical situations more certainty about this can be achieved by executing a pilot test.

Keywords**Controlled terms:**

air sparging apparatus, geomorfology, injection
permeability, physical characteristics

Uncontrolled terms:

entry pressure, heterogeneity,
flow rate, injection pressure, multiple phase flow

Project title

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

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 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 oliekarakterisatie 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), Oliekarakterisatie (juli 1998), Zonering (juli 2000), Perslucht (juli 2000) en een evaluerend Eindrapport (juli 2000). Voor u ligt het rapport "Perslucht".

The Three Engineers
juli 2000

INHOUD

		SAMENVATTING	v
		SUMMARY	vii
Hoofdstuk	1	TOEPASSINGSGEBIEDEN	1
Hoofdstuk	2	PRIMAIRE VRAGEN	3
	2.1	Krijg ik lucht in de bodem?	3
	2.2	Gaat de lucht waarheen ik wil?	3
	2.3	Hoeveel, waar en hoe?	4
Hoofdstuk	3	DENKKADER	5
	3.1	Stroming van lucht	5
	3.2	Cracking	10
	3.3	Heterogeniteit	12
Hoofdstuk	4	UITWERKING VAN HET DENKKADER	15
	4.1	Krijg ik lucht in de bodem? Intreedruk en cracking	15
	4.2	Gaat de lucht waarheen ik wil? Heterogeniteitsindexen	17
	4.2.1	Dispersie en schaduwzones	17
	4.2.2	Random walkmodel	18
	4.3	Hoeveel, waar en hoe? Drukken, debieten, invloedsgebieden en luchtverzadigingen	21
Hoofdstuk	5	PERSLUCHTPROEVEN	27
	5.1	Locatie Deventer A	27
	5.2	Locatie Deventer B	31
Hoofdstuk	6	HANDVATTEN	39
		LITERATUUR	43
Bijlage	A	PERSLUCHTINJECTIESYSTEEM	
Bijlage	B	LIGGING, DIEPTEN EN LENGTEN VAN DE INJECTIEFILTERS	
Bijlage	C	GEMETEN INTREEDRUKKEN	
Bijlage	D	BESCHRIJVING FILMPJES DRUKPATRONEN	
Bijlage	E	Qh-KROMMEN	
Bijlage	F	AIR SPARGING EXPERIMENTS	

SAMENVATTING

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

Om de toepassingsmogelijkheden van persluchtinjectie als saneringsvariant bij bodemverontreinigingen met olie te kunnen beoordelen, moet bij het ontwerp en bij de dimensionering van de sanering worden aangegeven of perslucht in de bodem kan worden ingebracht, of deze lucht de plekken in de bodem bereikt waar een saneringseffect nodig is, en zo ja, met welke druk en debiet, in hoeveel filters op welke diepte moet worden geïnjecteerd.

Perslucht kan in de bodem worden geïnjecteerd indien een druk kan worden aangelegd die groter is dan de intreedruk van de injectielaag, maar kleiner is dan de druk waarbij cracking optreedt.

De intreedruk is de druk die nodig is om de capillaire druk in de poriën van de injectielaag te overwinnen. De intreedruk kan worden gemeten als de kleinste druk waarbij voor het eerst stroming van lucht door het injectiesysteem meetbaar is. De intreedruk kan ook worden geschat uit een voor de injectielaag representatief veronderstelde Van Genuchtenkromme of worden afgeleid uit de Qh-kromme. Het rechtstreeks meten van de intreedruk is bij lage intreedrukken erg onnauwkeurig. In het ontwerpstadium kan derhalve beter gebruik worden gemaakt van schattingen op basis van Van Genuchtenkrommen. Indien in het dimensioneringsstadium alsnog een nauwkeuriger schatting noodzakelijk is, moet een Qh-kromme worden opgesteld. Schattingen van de intreedruk op basis van Van Genuchtenkrommen zijn vermeld in tabel 1 (zie 4.1).

Verticale cracking treedt op indien de luchtdruk de korrelspanning in de bodem volledig opheft. De gronddeeltjes kunnen dan horizontaal uit elkaar worden gedrukt, zodat enkele grotere scheuren ontstaan waarlangs vervolgens het grootste deel van de lucht kan ontsnappen. Door het ontsnappen van de lucht daalt de druk in de bodem en raken de meeste met perslucht gevulde poriën weer met water gevuld. Nadat eenmaal verticale cracking in de bodem is opgetreden, is daardoor weinig saneringsrendement meer van persluchtinjectie te verwachten.

Horizontale cracking treedt op indien de kritische schuifspanning van de gronddeeltjes wordt overschreden. Dit gebeurt doorgaans bij een druk die circa 0,6 maal de korrelspanning bedraagt. Bij horizontale cracking kunnen de gronddeeltjes ten opzichte van elkaar gaan verschuiven. Zij nemen daarbij posities in, waardoor de opgebouwde druk gemakkelijker kan wegvloeien. Doorgaans uit zich dit in een grotere horizontale doorlatendheid voor zowel lucht als water. In tegenstelling tot verticale cracking hoeft horizontale cracking niet nadelig te zijn voor het saneringseffect van de perslucht. Doorgaans stelt horizontale cracking wel een bovengrens aan de maximaal te bereiken druk.

De intreedruk en de druk waarbij horizontale en verticale cracking optreedt, kunnen als functie van de diepte en in relatie tot de grondsoorten waaruit de verschillende bodemlagen bestaan, worden weergegeven in een diagram. Een voorbeeld van een dergelijk diagram is weergegeven in figuur 6 (zie 4.1). Uit het diagram kan de speelruimte tussen de intreedruk en de druk van horizontale en verticale cracking worden vastgesteld.

De stroming van lucht door de bodem is erg gevoelig voor de aanwezigheid van gelaagdheden met afwijkende intreedruk en doorlatendheid. De gevoeligheid uit zich in de mate van dispersie, in het ontstaan van schaduwzones en in de gerichtheid van de luchtstroming.

Dispersie heeft een grotere horizontale verspreiding ten opzichte van de verticale verspreiding tot gevolg en leidt zodoende tot een groter invloedsgebied. De luchtverzadiging in het invloedsgebied neemt echter navenant af. De mate van dispersie hangt af van de aard van de bodem op porieschaalniveau.

Schaduwzones en gerichtheid van luchtstroming ontstaan door heterogeniteit van de bodem op groter schaalniveau. Onderscheid wordt gemaakt naar voorspelbare schaduwzones en gerichtheid ten gevolge van verschillen tussen lagen en in onvoorspelbare verschillen ten gevolge van de aanwezigheid van heterogeniteiten binnen lagen. In lagen en achter heterogeniteiten met een hoge intreedruk en een slechte doorlatendheid ontstaan schaduwzones waar lucht niet doordringt en waar het saneringseffect afwezig is of onvoldoende kan zijn.

Door scheefligging of een ongelukkige opeenvolging van heterogeniteiten kan de lucht bovendien in voorkeursrichtingen worden gedwongen. Met betrekking tot de aanwezigheid van lagen is dit geen groot probleem, omdat de ligging hiervan grotendeels bekend is en met de veroorzaakte afwijkende gerichtheid rekening kan worden gehouden. Voor heterogeniteiten is de aanwezigheid echter niet bekend. Het effect van de heterogeniteiten kan daardoor alleen in de vorm van een kansverdeling worden aangegeven. Om deze kans te kwantificeren wordt de bodem gekarakteriseerd naar heterogeniteitsindexen.

Heterogeniteitsindexen bestaan enerzijds uit heterogeniteitsdichtheden die aangeven hoeveel heterogeniteiten gemiddeld in een laag voorkomen en binnen welk bereik de afmetingen ervan liggen. Daarnaast bestaan heterogeniteitsindexen uit aangegeven bereiken waarbinnen de voor persluchtinjectie relevante eigenschappen van zowel de heterogeniteiten in de laag als de resterende 'bulk' van de laag variëren. Het effect van de heterogeniteit kan in grote lijnen worden beoordeeld door de heterogeniteitsindexen in te voeren in een random walkmodel. In het random walkmodel wordt zowel het stromen van lucht als de aanwezigheid van heterogeniteiten in de bodem als een stochastisch proces beschreven. Vanwege het stochastische karakter is voor een goed beeld uitvoering van meer dan één simulatie noodzakelijk. Met het bijgevoegde, eenvoudige simulatieprogramma op CD-rom is dit eenvoudig en snel uit te voeren.

Druk, debiet, luchtverzadiging en invloedsgebied hangen bij persluchtinjectie op een ingewikkelde manier met elkaar samen en kunnen alleen in onderlinge samenhang worden beoordeeld. Dit kan gebeuren via een iteratieproces waarbij gebruik wordt gemaakt van Van Genuchtenkrommen, de Wet van Ergun en een benadering voor de superficiële stroomsnelheid. Uit iteratieberekeningen voor een groot aantal verschillende grondsoorten blijkt dat bij gelijkblijvend debiet de druk van de lucht in de bodem slechts in zeer geringe mate varieert doordat de veranderingen ten gevolge van de stijging van lucht vooral tot uiting komen in een toenemende straal van het invloedsgebied en in de luchtverzadiging van de bodem. In de praktijk leidt dit tot een zeer eenvoudig dimensioneringshandvat, namelijk dat bij persluchtinjectie een druk moet worden aangelegd die slechts weinig groter is dan de druk die voor een bepaalde luchtverzadiging en debiet in een bovenliggende laag wordt gewenst. Deze druk moet alleen groter zijn dan de intreedruk en kleiner zijn dan de crackingdruk in alle bodemlagen tussen de injectiediepte en de diepte waarop zich de verontreiniging bevindt.

In kritische situaties kunnen de gepresenteerde handvatten onvoldoende nauwkeurig zijn. Meer zekerheid kan dan worden verkregen door een persluchtinjectieproef uit te voeren. Het belangrijkste doel hiervan moet dan zijn een Qh-kromme vast te stellen van het specifieke persluchtinjectiesysteem, inclusief de bodem waarin wordt geïnjecteerd. Met name voor het begintraject van de Qh-kromme is daarbij van belang dat een debietmeter wordt gebruikt waarmee kleine debieten nauwkeurig kunnen worden gemeten.

SUMMARY

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

In order to evaluate the applicability of air sparging as a potential remediation technique for oil polluted soils, several aspects of the soil must be known. Answer must be given to the question whether compressed air can be injected into the soil, whether this air reaches the spots in the soil that need a remediation effect, and if so, what pressure and flow rate should be maintained in how many filters and at which depth.

Compressed air can be injected into the soil when a pressure can be produced that is larger than the entry pressure of the injection layer but that is smaller than the pressure at which cracking will take place.

The entry pressure is the pressure that is needed to exceed the capillary pressure in the pores of the injection layer. The pressure can be measured as the smallest pressure at which air flow is perceived. The entry pressure can also be estimated by Van Genuchten curves or be extrapolated from the Qh-curve. At low entry pressures, it is very inaccurate to measure the entry pressure directly. Therefore, in the designing stage of the remediation process it is better to use Van Genuchten curves. If it is necessary to have a more accurate estimation during the dimensioning stage, a Qh-curve should be determined in a pilot study. Estimations of entry pressures based on Van Genuchten curves are listed in table 1 (see section 4.1).

Vertical cracking occurs when air pressure fully compensates grain stress. Soil aggregates can be pushed away from each other horizontally, causing larger vertical cracks. Most of compressed air will escape along these cracks. This causes a decrease of air pressure and most of the pores initially filled with air, get filled with water again. Once vertical cracking has occurred only little remediation profits of air sparging is expected.

Horizontal cracking appears when the critical shear stress of the soil aggregates has been exceeded. This usually occurs at a pressure of about 0.6 times grain stress. When horizontal cracking occurs, soil aggregates take new positions, in which pressure more easily flows away. This leads to a larger air and water permeability. Unlike vertical cracking, horizontal cracking is not necessarily an obstruction to remediation by air sparging. Horizontal cracking however sets a limit to the maximum achievable pressure.

Entry pressure and the pressure, at which horizontal and vertical cracking occur, can be presented in a diagram as function of depth and in relation to soil classes of which the respective layers are build of. An example of such a diagram is presented in figure 6 (see section 4.1). From the diagram it is possible to determine the margin between the entry pressure which is necessary and the maximum achievable pressures which are limited by horizontal and vertical cracking.

Airflow in soil is very sensitive to the presence of layers and heterogeneities with different entry pressures and permeabilities. This manifests in dispersivity, in developing of shadow zones and in directedness of the airflow.

Dispersion benefits horizontal distribution and leads to a larger area of influence. On the contrary, air saturation within the area of influence proportionally decreases. The extension of dispersion depends on soil structure at pore level.

Shadow zones and directedness of airflow arises from soil heterogeneity on a larger scale. Difference should be made between predictable shadow zones caused by known differences between layers and unpredictable shadow zones caused by the random presence of differences between heterogeneities within layers. Shadow zones occur behind layers and heterogeneities having higher entry pressure and lower permeability. In these shadow zones, no air permeates and remediation effect either is absent or is insufficient.

Besides, air can be forced into preferential directions because of some (unfortunate) succession of heterogeneities. With respect to layers, prediction of directedness is not a big problem while their positions are known for the greater part and deviations from normal pattern can be predicted. For heterogeneities however, the effect can only be described properly by probability distributions. To quantify these distributions, the soil is characterized in terms of heterogeneity indexes.

Heterogeneity indexes consist on the one hand of heterogeneity densities which indicate how many heterogeneities layers moderately consist of and how far their dimensions reach. On the other hand, the indexes consist of minimum and maximum values between which relevant characteristics as entry pressure and air permeability vary. The effect of heterogeneity can be evaluated by importing the heterogeneity indexes into a 'random walk' model. In such a model, the flow of air as well as the presence of soil heterogeneities are described by a stochastic process. Because of the stochastic character, more than one simulation has to be executed. To do this easily a simulation program is added on CD-ROM.

Within air sparging, pressure, flow rate, air saturation and area of influence are related in a complicated way. Therefore they have to be evaluated together. Evaluation can be done by iteration, using Van Genuchten curves, Ergun's law and some approach of the superficial flow rate. Calculations of the relationships for a variety of soils show that air pressure drops only to a very small degree with decreasing depth at equal flow rate. This appears because changes in pressure due to the ascending of the air mostly result in increasing radii of influence and increasing air saturation. In practice, this leads to a quite simple dimensioning grip: For air sparging, only a pressure has to be conducted, that is just a little larger than the pressure which is needed to achieve the desired air saturation in or the desired air flow through the critical layer. The pressure only has to be larger than the entry pressure and smaller than cracking pressure in all soil layers between the injection depth and the depth where the pollution is situated.

In critical situations, the accuracy of the presented grips can be insufficient. More certainty can be obtained by executing a pilot test. Most important goal is to determine the Qh-curve of the specific injection system, including the soil that has to be injected. Especially for determining the lower part of the curve it is important to use a flow meter that accurately measures small flows.

HOOFDSTUK 1

TOEPASSINGSGEBIEDEN

In dit rapport inzake de cluster "Perslucht" wordt ingegaan op de wijze waarop de bodem van invloed is op de saneringspotenties van perslucht. Evenals in de cluster "Olie" wordt ook in de cluster "Perslucht" aangegeven op welke wijze de relevante kenmerken, in dit geval van de bodem, met betrekking tot de potentiële saneringsmogelijkheden van perslucht in beeld kunnen worden gebracht. Ten dele wordt daarbij gebruik gemaakt van de technieken zoals die in de cluster "Zonering" zijn ontwikkeld en in de rapportage inzake "Zonering" zijn beschreven.

De verschillende toepassingsgebieden stellen afzonderlijke eisen aan het gedrag van perslucht in de bodem. In alle gevallen gaat het er daarbij om of lucht in voldoende mate terecht komt op die plaatsen in de bodem waar zich de olieverontreiniging bevindt of van waaruit een saneringseffect op de verontreiniging optreedt. Onderscheid kan worden gemaakt naar de verschillende stadia waarin het ontwerp- en dimensioneringsproces zich bevindt. In het eerste ontwerpstadium zal veelal de vraag worden gesteld in hoeverre de bodem überhaupt geschikt is. Kan perslucht in de bodem worden geïnjecteerd en is de richting en de wijze waarop het zich verspreidt voorspelbaar? Indien dit het geval is, kan in een later ontwerpstadium meer specifiek worden aangegeven in welke laag hoeveel debiet of hoeveel luchtverzadiging haalbaar is. Tenslotte kunnen deze zaken in een dimensioneringsstadium nog verder worden uitgewerkt in de vorm van aantallen injectiepunten, de diepte van de injectiefilters, de in te stellen druk en het injectieregime.

De belangrijkste oorzaken van het falen of stagneren van saneringen met behulp van persluchtinjectie liggen in een onvoldoende begrip van het proces van luchtstroming door de bodem en van de gevoeligheid van de luchtstroming voor de heterogeniteit van de bodem [Marley et al., 1996]. De saneringshandvatten zijn daarom hoofdzakelijk rond deze beide aspecten opgebouwd.

In dit rapport is in hoofdstuk 1 aangegeven welke vragen door de saneringsdeskundige in de verschillende stadia van het ontwerp- en dimensioneringsproces moeten worden beantwoord. In hoofdstuk 2 zijn deze primaire vragen verder uitgewerkt en is aangegeven welke kennis, hulpmiddelen en/of bodemkarakteristieken voor de beantwoording nodig zijn. De benodigde kennis is gebaseerd op een (theoretisch) concept dat in hoofdstuk 3 is beschreven. Dit concept omvat een denkkader ten aanzien van het gedrag van lucht in de bodem en de stabiliteit van de bodem tegen het zogenaamde 'cracking' én een denkkader ten aanzien van heterogeniteit. In hoofdstuk 4 worden de implicaties van het denkkader aangegeven in de vorm van daaruit voortkomende hulpmiddelen en vast te stellen karakteristieken. De toepasbaarheid van theorie, hulpmiddelen en karakteristieken wordt tenslotte in hoofdstuk 5 geëvalueerd aan de hand van veldgegevens van twee locaties, waarna de conclusies van de voorgaande hoofdstukken in de vorm van handvatten worden gepresenteerd in hoofdstuk 6.

HOOFDSTUK 2

PRIMAIRE VRAGEN

2.1 Krijg ik lucht in de bodem?

De vraag of perslucht in de bodem kan worden geïnjecteerd, hangt samen met de intreedruk van het systeem. Het systeem omvat zowel het injectiesysteem - de pomp, de aanvoerbuizen inclusief knikpunten en de filters - als de bodem waardoor de lucht stroomt, c.q. waarop de stroming van lucht effect heeft. Dit laatste kan de gehele bodem zijn tussen het injectiepunt en de grondwaterspiegel, maar ook een deel daarvan indien de lucht zich bijvoorbeeld onder een slecht doorlatende laag ophoopt.

De injectie van lucht kan worden belemmerd indien de benodigde intreedruk van het systeem groter is dan de capaciteit van de pomp. Daarnaast kan de injectie worden belemmerd indien deze druk in beginsel wel door de pomp kan worden geleverd maar daarbij de korrelspanning van de bodem wordt overschreden. Door de injectie worden de gronddeeltjes dan uit elkaar gedrukt en ontstaan er enkele scheuren waarlangs alle geïnjecteerde lucht ontsnapt. Er treedt dan 'cracking' op. Bij cracking wordt het beoogde contact tussen de geïnjecteerde lucht en de verontreiniging, c.q. de beluchting van de bodem, veelal niet tot stand gebracht of is dit contact of deze beluchting niet beheersbaar. Op grote schaal optredende cracking is derhalve ongewenst. Op lokale schaal echter, of indien het pas dichtbij de grondwaterspiegel optreedt, is cracking mogelijk niet problematisch.

In een eerste ontwerpstadium is dus inzicht vereist in de druk die nodig is om lucht in een bodem(laag) te injecteren en de druk waarbij cracking optreedt. Hiervoor is theoretische kennis nodig inzake het optreden van cracking alsmede een methode om op basis van gangbare praktijkgegevens de benodigde druk en de crackingdruk van een bodem of bodemlaag te voorspellen.

2.2 Gaat de lucht waarheen ik wil?

Het saneringseffect van een persluchtinjectie valt of staat met de mate waarin de geïnjecteerde lucht de bodem ter plaatse van de verontreiniging beïnvloedt. Een persluchtvariant valt zeker af indien met grote mate van zekerheid kan worden gezegd dat het beoogde effect niet kan worden gerealiseerd. De variant is echter ook al minder aantrekkelijk indien het beoogde effect onzeker is. Dit geldt met name in situaties waarin het effect moeilijk of pas op lange termijn kan worden gemeten en bijsturing via instelbare procesparameters niet mogelijk is. Het gaat er derhalve om in hoeverre het effect van perslucht kan worden voorspeld.

In de voorspelling van het effect van persluchtinjectie speelt de heterogeniteit van de bodem een overheersende rol. Heterogeniteit werkt op drie manieren door:

- Door heterogeniteiten treedt dispersie op. Door dispersie wordt een groter bodemvolume doorstroomd, maar is de intensiteit van de doorstroming kleiner. Het voorkomen van dispersie - en dus van heterogeniteiten - kan daardoor zowel positief als negatief doorwerken in de sanering.
- Door heterogeniteiten ontstaan 'schaduwzones'. In schaduwzones treedt geen direct contact op tussen de perslucht en de verontreiniging. Het voorkomen van schaduwzones - en dus van heterogeniteiten - werkt negatief door indien zich in deze zones een belangrijk deel van de verontreiniging bevindt.

- Door heterogeniteiten kan perslucht in voorkeursrichtingen worden gedwongen, waardoor het effect ervan acentrisch is. Ook dit werkt negatief door indien de mate van acentrisch zijn onvoorspelbaar en daardoor onbeheersbaar is.

In een eerste ontwerpstadium is dus tevens inzicht vereist in de mate waarin heterogeniteiten de voorspelbaarheid en beheersbaarheid van persluchtinjectie kunnen beïnvloeden. Hiervoor is zowel theoretische kennis nodig inzake de effecten van verschillende vormen van heterogeniteit op het gedrag van perslucht in de bodem als een methode om op basis van gangbare praktijkgegevens de mate van deze heterogeniteitsvormen te kunnen inschatten.

2.3 Hoeveel, waar en hoe?

De benodigde intreedruk, het wel of niet optreden van cracking en de voorspelbaarheid van het persluchteffect geven een eerste indruk van de geschiktheid van een bodem voor persluchtinjectie. Indien een bodem in dit stadium geschikt bevonden wordt, komen secundaire vragen naar voren die te maken hebben met hoeveel, waar en hoe.

Van primair belang zijn daarin de relaties tussen de straal van het invloedgebied ('radius of influence' of ROI) en injectieregime, tussen druk en debiet (de Qh-kromme) en tussen druk en luchtverzadiging ($P_c S_w$ -curve of pF-curve). De straal van het invloedgebied bepaalt het aantal en daarmee de onderlinge afstand tussen de injectiepunten. De Qh-kromme geeft inzicht in het debiet dat bij een zekere maximaal instelbare dan wel bedrijfsmatig haalbare druk kan worden gerealiseerd. De $P_c S_w$ -curve geeft het poriepercentage aan dat bij de betreffende druk luchtgevuld raakt.

Met deze grootheden kan in de beginperiode van de injectie tot op zekere hoogte worden gespeeld. Een hoge injectiedruk vanaf het begin resulteert in een hoge druk rondom het injectiepunt, omdat het water niet zo snel opzij geduwd kan worden. De hoge druk resulteert in een hoog percentage luchtgevulde poriën, waardoor het betreffende debiet door een kleiner bodemvolume zijn weg vindt dan indien dezelfde einddruk vanaf het begin rustig wordt opgebouwd. In dat geval krijgt het water meer tijd om weg te stromen, waardoor de druk rondom het injectiepunt minder hoog oploopt en minder (alleen de grootste) poriën luchtgevuld raken.

Bij langzaam opbouwen van de druk resulteert de luchtinjectie in vergelijking tot het in één keer opzetten van dezelfde druk derhalve in een groter beïnvloed gebied waarin de luchtverzadiging echter kleiner is. Afhankelijk van het beoogde saneringseffect - strippen of beluchten - kan hiervan door de saneringsdeskundige gebruik worden gemaakt.

Het effect van de verschillende injectieregimes is overigens alleen in de aanvangfase van een sanering aanwezig. Zodra zich een luchtgevuld bodemvolume van zekere grootte heeft gevormd, manifesteert 'meer pompen' zich - althans in de zandige lagen die doorgaans voor persluchtinjectie in aanmerking komen - niet zozeer in drukverhoging maar in een hoger debiet.

In de latere ontwerpstadia en in het dimensioneringsstadium is dus inzicht nodig in de relaties tussen de invloedssstraal, de Qh-kromme en de $P_c S_w$ -curve van de bodem en moeten manieren worden gevonden om deze relaties aan de hand van gangbare praktijkgegevens af te leiden of te schatten. Tevens is inzicht nodig in de omstandigheden waaronder de relaties wel en niet mogen worden gebruikt. Hierbij speelt het onderscheid tussen bellenbanen en luchtbanen een rol.

HOOFDSTUK 3

DENKKADER

3.1 Stroming van lucht

De druk in een luchtlichaam op een diepte h in de bodem is gelijk aan de som van de hydrostatische druk, de capillaire druk en de druk die wordt opgeroepen door de weerstand van het bodemwater tegen verplaatsing:

$$P(h) = P_{\text{hyd}}(h) + P_{\text{cap}}(h) + P_{\text{vpl}}(Q)$$

waarin:

- $P(h)$ is de druk in het luchtlichaam op diepte h ;
- $P_{\text{hyd}}(h)$ is de hydrostatische druk op diepte h ;
- $P_{\text{cap}}(h)$ is de capillaire druk op diepte h ;
- $P_{\text{vpl}}(Q)$ is de benodigde druk voor waterverplaatsing met debiet Q op diepte h .

Naast de capillaire druk bestaat er ook nog een osmotische druk. Osmotische drukken zijn vooral van belang in kleigronden. Deze kunnen daarin groter zijn dan de capillaire druk. Omdat in de praktijk echter nauwelijks onderscheid tussen beide drukken kan worden gemaakt en de term matrixdruk voor de som van beide drukken minder gangbaar is, wordt in dit rapport de term capillaire druk gehanteerd waarmee dan de matrixdruk (= som van de capillaire én de osmotische druk) wordt bedoeld.

Voor de overdruk in een luchtlichaam op diepte h ten opzichte van de hydrostatische druk geldt dan:

$$P^* = P(h) - P_{\text{hyd}}(h) = P_{\text{cap}}(h) + P_{\text{vpl}}(Q)$$

waarin:

- P^* is de overdruk op diepte h .

De overdruk in een luchtlichaam in de bodem is gelijk aan de druk die nodig is om het grensvlak tussen de waterfase en de luchtfase in stand te houden (de capillaire druk) en de druk die het luchtlichaam nodig heeft om water te verplaatsen. Indien het luchtlichaam niet verplaatst, is de laatste term nihil en is de overdruk in het luchtlichaam gelijk aan de capillaire druk.

Lucht kan zich in beginsel op twee verschillende manieren door de bodem verplaatsen: via bellenbanen en via luchtkanalen. Het verschil tussen beide manieren uit zich in de drukval ten gevolge van de wrijving van stromende lucht langs de poriewanden. Deze doet zich in bellenbanen niet en in luchtkanalen wel voor.

Bellenbanen

Luchtbellen, die via een bellenbaan stromen, verplaatsen zich als geheel en moeten als gevolg daarvan een druk hebben die steeds voldoende is voor het overwinnen van de capillaire druk en van de weerstand tegen het verplaatsen van water. Binnen de luchtbellen vindt geen stroming van lucht plaats. Er is derhalve geen extra druk nodig om de drukval ten gevolge van wrijving van lucht langs de poriewanden te compenseren.

Bij stroming van luchtbellen in een bellenbaan geldt voor de drukval tussen twee punten:

$$\Delta P^*(h) = [P(h_1) - P(h_0)] + [P_{\text{hyd}}(h_1) - P_{\text{hyd}}(h_0)] = [P_{\text{cap}}(h_1) - P_{\text{cap}}(h_0)] + [P_{\text{vpl}}(Qh_1) - P_{\text{vpl}}(Qh_0)]$$

waarin:

$\Delta P^*(h)$ is de drukval tussen twee punten op diepte h in de bodem.

Een stijgende luchtbel ondervindt met toenemende hoogte steeds minder hydrostatische (tegen)druk ($P_{\text{hyd}}(h_1) - P_{\text{hyd}}(h_0) < 0$). Dit betekent dat de bel ten gevolge van het stijgen druk 'beschikbaar' krijgt om hetzij een grotere capillaire druk te overwinnen, hetzij water sneller weg te drukken. Ook expansie van de bel is een mogelijke uitlaatklep voor de ontstane overdruk maar de mate waarin dit in de bodem een rol speelt, wordt sterk bepaald door de poriestructuur. Zolang de luchtbellen kleiner zijn dan de poriën waardoor zij stromen, treedt zeker ook expansie op. Daardoor krijgen de luchtbellen echter al snel een diameter die gelijk is aan de poriediameter en waardoor verdere expansie wordt belemmerd door de korreldruk. Pas wanneer de druk in de bellen zo hoog oploopt dat de korreldruk wordt overschreden, kan verdere expansie optreden. Er treedt dan 'cracking' op. Op cracking wordt nader ingegaan in 3.2.

Dus ten gevolge van de stijging kan:

- de luchtbel in potentie door kleinere poriën gaan stromen, waarvoor een grotere capillaire druk moet worden overwonnen;
- de luchtbel in potentie sneller gaan stromen; waarvoor een grotere druk tegen waterverplaatsing moet worden overwonnen.

In beginsel neemt een luchtbel altijd de weg van de minste weerstand en kiest deze in een homogeen pakket nooit voor een stroombaan door kleinere poriën. In een homogene laag wordt de energiewinst ten gevolge van het opstijgen van de luchtbel derhalve benut voor een snellere verplaatsing. Het sterk toenemen van de benodigde druk voor waterverplaatsing zorgt er daarbij voor dat de stijgsnelheid van de luchtbellen niet 'oneindig' groot wordt.

De potentie om de capillaire druk in kleinere poriën te overwinnen, kan wel een rol spelen bij laagovergangen naar lagen met (gemiddeld) kleinere poriën. Van de druk die bij het stijgen beschikbaar komt, is dan een groter deel nodig voor het 'intreden' in de slechter doorlatende laag. Er blijft dus minder druk over voor het overwinnen van de weerstand tegen waterverplaatsing in die laag, waardoor de stijgsnelheid in die laag kleiner is. Daardoor kan onder de laagovergang ophoping van lucht plaatsvinden in de vorm van een luchtkussen. Een luchtkussen kan uiteraard ook ontstaan indien de opwaartse druk kleiner is dan de capillaire druk die nodig is om de nieuwe laag in te dringen.

Luchtkanalen

Lucht stroomt in luchtkanalen indien het luchtlichaam zich niet als geheel verplaatst maar zich uitsluitend aan de uiteinden uitbreidt. Daarvoor is niet alleen druk nodig om de capillaire druk en de weerstand van het water tegen verplaatsing aan deze randen te overwinnen, maar moet ook lucht naar deze uiteinden worden verplaatst. Dit laatste gaat gepaard met een drukverlies ten gevolge van de wrijving van de stromende lucht langs de poriewanden. Om aan de uiteinden van de luchtkanalen dus nog voldoende druk over te hebben voor het overwinnen van de capillaire druk en de weerstand tegen waterverplaatsing, is bij stroming door luchtkanalen ook druk nodig om voor dit drukverlies te compenseren. Daartegenover staat dat, behalve aan de uiteinden, binnen de luchtkanalen geen capillaire druk meer hoeft te worden overwonnen en geen water meer hoeft te worden verplaatst. Dit is al gebeurd. Druk om de capillaire druk en de weerstand

tegen waterverplaatsing te overwinnen is slechts nodig aan de uiteinden van de kanalen waar uitbreiding plaatsvindt. Bij stroming van lucht door een luchtkanaal geldt derhalve voor de drukval tussen het injectiepunt en het punt waar uitbreiding van het luchtkanaal plaatsvindt:

$$\Delta P^*(h) = P_{\text{cap}}(h_1) + P_{\text{vpl}}(Qh_1) + P_{\text{wrv}}(h_{\text{inj}} \rightarrow h_1)$$

waarin:

$P_{\text{wrv}}(h_{\text{inj}} \rightarrow h_1)$ is de benodigde druk ter compensatie van het wrijvingsverlies van de lucht langs de poriënwanden tussen het injectiepunt en het punt op diepte h_1 .

In een stationaire situatie, waarbij dus geen uitbreiding van het luchtkanaal plaatsvindt, geldt:

$$\Delta P^*(h) = P_{\text{wrv}}(h_{\text{inj}} \rightarrow h_1)$$

Vanwege de afhankelijkheid van de drukval ten gevolge van luchtwrijving van de stroomsnelheid van de lucht in de poriën zijn in luchtkanalen allerlei verschillende combinaties mogelijk van de wijze waarop de beschikbare druk wordt verdeeld over het overwinnen van de capillaire druk in kleinere poriën en het verplaatsen van water. In luchtbellen is slechts één combinatie mogelijk.

Bij het ontstaan van luchtkanalen is de druk rondom het injectiepunt aanvankelijk relatief hoog, doordat de waterverplaatsingscomponent groot is. Als gevolg daarvan worden rondom het injectiepunt aanvankelijk ook kleinere, en dus meer, poriën opengedrukt. Al deze poriën vormen de beginpunten van afzonderlijke luchtkanalen. Naarmate de luchtkanalen zich, bij gelijkblijvend debiet, verder uitbreiden en het luchtgevulde poriënvolume groter is, neemt de waterverplaatsingscomponent in de druk af. Aanvankelijk opengedrukte poriën nabij het injectiepunt kunnen daardoor opnieuw waterverzadigd raken, waardoor het aantal luchtkanalen in de loop van het injectieproces weer kan afnemen (pulserend effect). Daar staat tegenover dat voor het verdringen van de lucht in de kleinere poriën ook het water een relatief hoge intreedruk moet overwinnen zodat een deel van de luchtkanalen, die via relatief kleine poriën in verbinding staan met het injectiefilter, toch openblijven.

Als gevolg van het 'inklappen' van een deel van de aanvankelijk met lucht gevulde poriën, zodra de lucht zich over een groter bodemvolume kan verdelen, geldt dat [Smith et al., 1996]:

- deze volumevermindering alleen kan worden tegengegaan door het injectiedebiet geleidelijk op te voeren;
- opgeloste verontreinigende stoffen bij aanvang van de injectie zijwaarts verdrongen kunnen worden naar bodemgedeelten die na het 'inklappen' niet meer worden doorstroomd;
- invloedsgebieden van persluchtinjectie bij kortdurende injectieproeven te groot kunnen worden geschat.

Naarmate de luchtkanalen zich uitbreiden tot hoger gelegen lagen kan de overdruk met afnemende diepte toenemen doordat de hydrostatische (tegen)druk afneemt. De overdruk bij de uiteinden is dan hoger dan bij het injectiepunt, waardoor bij de uiteinden kleinere, en ook meer poriën worden opengedrukt. Er ontstaat een kenmerkend vingerpatroon met meer en fijnere vertakkingen nabij de uiteinden. Een kenmerkend vingerpatroon is weergegeven in figuur 1. In deze figuur stroomt de lucht van links naar rechts en verdringt deze een visceuze, lichte olie. Het vingerpatroon heeft tot gevolg dat de luchtverzadiging aan de uiteinden van de luchtkanalen groter is dan bij het injectiepunt. Zolang de bodem als gevolg van persluchtinjectie nog geen stabiele eindsituatie heeft bereikt, dat wil zeggen zolang in- en uitstromend debiet nog niet aan

elkaar gelijk zijn en er derhalve sprake is van drukopbouw, treden er dus twee, deels elkaar compenserende processen op.

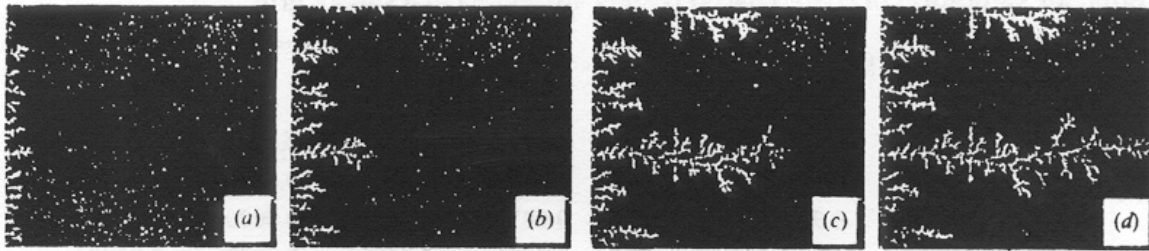


Fig. 1. Vingerpatroon (naar [Lenormand et al., 1988]).

Aan de ene kant zorgt de aanvankelijk hoge druk voor het opendrukken van relatief kleine poriën waardoor kortsluitingen kunnen ontstaan naar nabijgelegen grote poriën die dan snel kunnen worden leeggedrukt. Het snel toenemende bodemvolume, waarlangs het instromende debiet vervolgens kan worden afgevoerd, zorgt voor een afname van de druk waardoor een deel van de aanvankelijk opengedrukte poriën weer waterverzadigd raakt en een deel van de aanvankelijk aanwezige luchtkanalen weer wordt afgesloten. Aan de andere kant neemt de overdruk met afnemende diepte toe waardoor met toenemende afstand tot aan het injectiepunt de luchtverzadiging in de blijvend luchtgevulde poriën groter is.

De stroming van lucht door bellenbanen of door luchtkanalen wordt grotendeels bepaald door de grootte van de poriën. Wehrle [1990] stelt dat bellenbanen slechts aanwezig zijn in grof zand. In fijnere zanden en in meer cohesieve gronden verplaatst lucht zich via luchtkanalen. Het ontstaan van luchtkanalen heeft tot gevolg dat de lucht in beginsel slechts 'enkele' paden kiest en derhalve slechts een deel van de doorstroomde bodem direct bereikt. De mate waarin dit het saneringseffect beïnvloedt, hangt af van het beoogde saneringsdoel en de dichtheid van de luchtkanalen [Baker en McKay, 1996; Marley et al., 1996].

Qh-kromme en luchtverzadiging

Wanneer lucht in de bodem wordt geïnjecteerd, moet water worden verplaatst. Volgens de eerder gegeven vergelijkingen bestaat er een relatie tussen de overdruk en het luchtdebiet. Deze relatie wordt weergegeven door de Qh-kromme. Een kenmerkend verloop van een Qh-kromme is weergegeven in figuur 2.

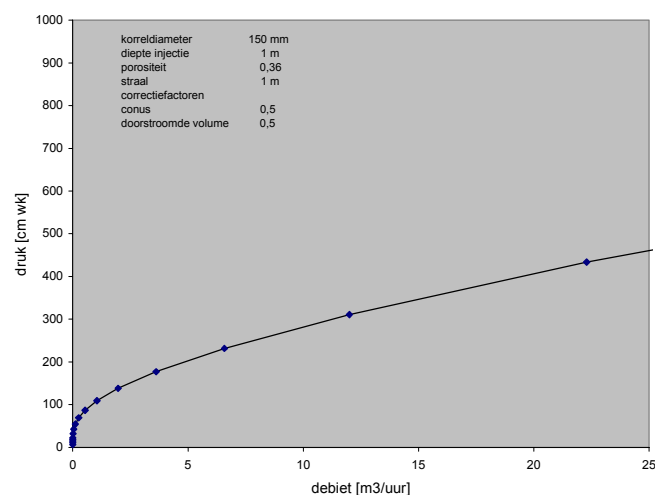


Fig. 2. Qh-kromme voor sterk lemig zand.

Behalve met het debiet is de overdruk in de bodem ook gerelateerd aan de luchtverzadiging. Deze relatie wordt weergegeven door de $P_c S_w$ -curve (pF-curve). Een kenmerkend verloop van een $P_c S_w$ -curve is weergegeven in figuur 3.

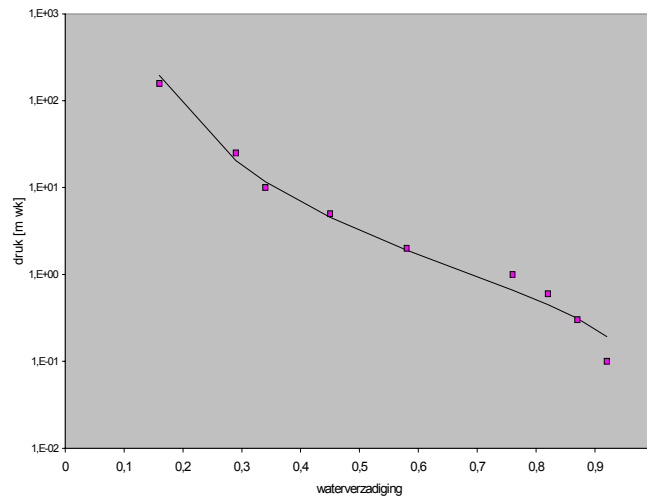


Fig. 3. $P_c S_w$ -curve voor sterk lemig zand.

Uit de $P_c S_w$ -curve kan de luchtverzadiging als percentage van het poriënvolume en als functie van de opgelegde overdruk worden afgelezen. Uit de overdruk kan bovendien de minimale diameter worden afgeleid van de poriën waarin de capillaire druk wordt overschreden. Poriën met deze, en met grotere diameter zijn dus luchtgevuld. Voor de minimale poriediameter van de luchtgevulde poriën geldt::

$$2r = \frac{\sigma}{P_{cap}}$$

waarin:

- r is de poriediameter;
- σ is de oppervlaktespanning voor het grensvlak water-lucht;
- P_{cap} is de capillaire druk.

Behalve ten aanzien van de intreedruk geeft de $P_c S_w$ -curve ook informatie over de maximale druk die in een bodemlaag kan worden bereikt en daarmee over de maximaal bereikbare luchtverzadiging. De druk in een bodemlaag kan oplopen zolang de lucht moeite heeft om een uitgang te vinden. Zodra deze gevonden is en alle lucht via deze uitgangen kan wegstromen, vindt geen verdere drukopbouw meer plaats of valt deze mogelijk zelfs terug [White et al., 1972]. De druk, waarbij geen verdere toename van het luchtgevulde poriënvolume meer wordt verwacht, is de injectiedruk [Baker en McKay, 1996].

De Qh-kromme en de $P_c S_w$ -curve geven informatie over de relaties tussen doorlatendheid, verzadiging en druk die op hun beurt bepalend zijn voor het gedrag van perslucht in de bodem [Clayton, 1996b; Lundegard en Andersen, 1996]. Op deze relaties wordt nader ingegaan in 4.3.

3.2 Cracking

De korrelspanning is de druk waarmee gronddeeltjes in de bodem op elkaar rusten. De korrelspanning is gelijk aan het verschil tussen de grondspanning en de hydrostatische druk:

$$P_{ksp(h)} = P_{gsp(h)} - P_{hyd(h)}$$

waarin:

$$\begin{aligned} P_{ksp(h)} & \text{ is de korrelspanning op diepte } h; \\ P_{gsp(h)} & \text{ is de grondspanning op diepte } h. \end{aligned}$$

Indien de overdruk op een bepaald punt in de bodem de korrelspanning op dat punt overschrijdt, worden de gronddeeltjes uit elkaar gedrukt en verandert de poriestructuur. Er treedt dan verticale cracking op en de lucht zal via de nieuw ontstane, grotere poriën naar boven ontsnappen. Indien verticale cracking optreedt, is het effect van persluchtinjectie in de hoger gelegen lagen doorgaans nihil.

De korrelspanning in de bodem wordt geleverd door de druk van de korrels op elkaar en door de weerstand tegen het verschuiven van de korrels ten opzichte van elkaar. De laatste component is de schuifspanning en heeft een maximale waarde. Indien deze kritische schuifspanning wordt overschreden, treedt 'afschuiving' op. De kritische schuifspanning staat in relatie tot de normale korrelspanning volgens:

$$P_{ssp,kr(h)} = c + \tan\phi \cdot P_{ksp(h)}$$

waarin:

$$\begin{aligned} P_{ssp,kr(h)} & \text{ is de kritische schuifspanning op diepte } h; \\ c & \text{ is de cohesiefactor;} \\ \tan\phi & \text{ is de hoek van de inwendige wrijving.} \end{aligned}$$

In veel zandgronden bedraagt de hoek van de inwendige wrijving circa 30° en is de cohesiefactor verwaarloosbaar. Er geldt dan bij benadering:

$$P_{ssp,kr(h)} = 0,6 \cdot P_{ksp(h)}$$

Door de injectie van perslucht wordt de gronddruk niet meer uitsluitend gecompenseerd door de hydrostatische druk en de korrelspanning maar deels ook door de luchtdruk. De luchtdruk neemt als het ware een deel van de 'taak' van de korrelspanning over. Met de afname van de korrelspanning neemt echter ook de kritische schuifspanning af. Indien de druk in de lucht daarbij een waarde bereikt van circa 0,6 maal de korrelspanning kunnen de gronddeeltjes ten opzichte van elkaar gaan schuiven. Er treedt dan voornamelijk in het horizontale vlak een herrangschikking van de korrels op, waardoor de poriënstructuur kan wijzigen. Dit wordt horizontale cracking genoemd. De verdeling van de krachten die op een bodemdeeltje werken is weergegeven in figuur 4.

Het voornaamste effect van horizontale cracking is dat een sterkere horizontale verspreiding van lucht kan optreden. In tegenstelling tot verticale cracking hoeft horizontale cracking niet te betekenen dat persluchtinjectie in de hoger gelegen lagen geen (sanerings)effect meer heeft. De structuur in deze lagen behoeft niet door horizontale cracking in een onderliggende laag te veranderen. Verticale cracking stelt een limiet aan de drukopbouw in de bodem. Zodra verticale

cracking optreedt, neemt de weerstand tegen luchtverplaatsing door de vorming van (enkele) grote(re) poriën sterk af.

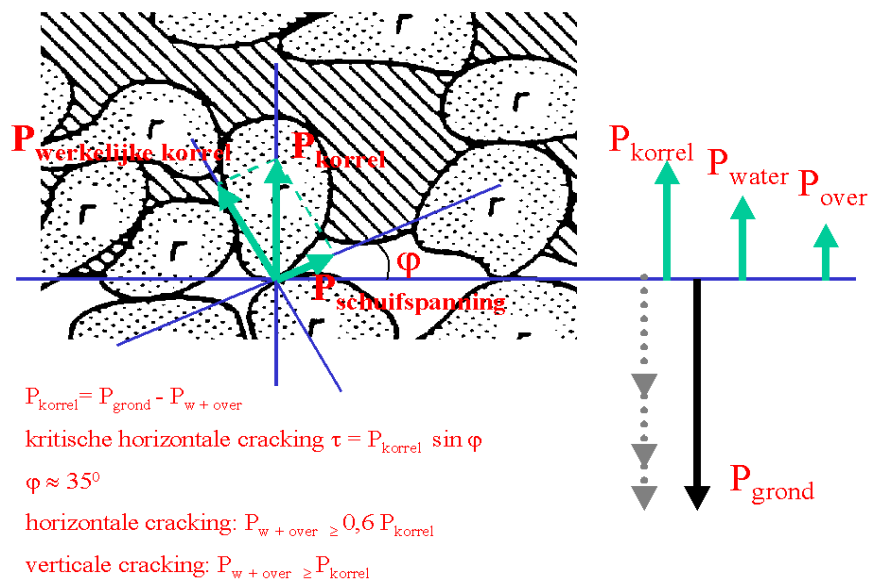


Fig. 4. Krachtenverdeling op een bodemdeeltje bij het proces van horizontale cracking.

Bij horizontale cracking kunnen twee processen optreden. Er kan een zodanige herrangschikking van korrels plaatsvinden dat de nieuwe kritische schuifspanning tussen de korrels in de laag weer gelijk is aan het verschil tussen de gronddruk en de hydrostatische druk in het afschuifvlak. Bij een langzame drukopbouw heeft dit in beginsel een verschuiving tot gevolg naar grotere waarden (tussen 0 en 90°) van de hoek van inwendige wrijving. Ten gevolge van horizontale cracking hebben korrels dan de neiging om 'naast elkaar te zakken'. Wanneer de korrels in staat zijn om tijdens het proces van horizontale cracking steeds posities te vinden waarvoor hogere kritische schuifspanningen gelden, stelt horizontale cracking in tegenstelling tot verticale cracking geen limiet aan de drukopbouw.

De overdruk, waardoor de horizontale cracking wordt veroorzaakt, is het gevolg van de weerstand tegen waterverplaatsing. De herrangschikking van de gronddeeltjes kan ook tot gevolg hebben dat deze weerstand wordt verminderd. Horizontale cracking leidt dan tot een directe verlaging van de overdruk tot de druk waarbij horizontale cracking voor het eerst optreedt. Doordat de overdruk in het systeem niet beslist een luchtdruk hoeft te zijn maar kan worden 'doorgegeven' aan het water, hoeft horizontale cracking niet beperkt te blijven tot de luchtkanalen maar kan het overal in het bodemsysteem optreden waar de druk door de persluchtinjectie wordt beïnvloed. In tegenstelling tot het proces waarbij het bodemsysteem tendent naar een systeem waarbij de korrels een maximale kritische schuifspanning ten opzichte van elkaar hebben, stelt horizontale cracking bij het 'wegvloeien' van de druk, door het verminderen van de weerstand tegen waterstroming, wel een limiet aan de drukopbouw in de bodem.

De limiet aan de drukopbouw voor horizontale cracking is lager dan die voor verticale cracking. Verticale cracking treedt daardoor alleen op indien de druk zo plotseling wordt opgebouwd dat deze geen tijd heeft om via het verminderen van de weerstand tegen waterstroming weg te vloeien. Bij een langzame drukopbouw is deze tijd er wel en zal de druk in de bodem de horizontale crackingdruk niet of nauwelijks overschrijden.

Verticale cracking is doorgaans het gevolg van het verhogen van de injectiedruk bij stagnerende luchtverplaatsing. De overdruk in een luchtlichaam bij stagnatie van de luchtstroming op een diepte h wordt bij aanwezigheid van luchtkanalen beschreven door:

$$P^*(h) = P^*(h_{inj}) - P_{cap}(h) - P_{wrv}(h_{inj} \rightarrow h)$$

waarin:

- $P^*(h_{inj})$ is de overdruk op de injectiediepte;
- $P_{cap}(h)$ is de capillaire druk (intreedruk) op de injectiediepte;
- $P_{wrv}(h_{inj} \rightarrow h)$ is de drukval door het wrijvingsverlies ten gevolge van de stroming van de lucht vanaf de injectiediepte.

Verticale cracking treedt dus op indien de druk in de bodem overal onvoldoende is om ter plaatse de capillaire druk te overwinnen maar deze wel de korrelspanning overschrijdt. Voor verticale cracking geldt:

$$P^*(h_{inj}) - P_{cap}(h) - P_{wrv}(h_{inj} \rightarrow h) > P_{ksp}(h)$$

Om enerzijds (ongestoorde) stroming van lucht mogelijk te maken en anderzijds verticale cracking te voorkomen, moet de overdruk op ieder punt in de bodem groter zijn dan de capillaire druk maar kleiner zijn dan de korrelspanning ter plaatse:

$$P_{cap}(h) < \Delta P(h_{inj}) - P_{wrv}(h_{inj} \rightarrow h) < P_{ksp}(h)$$

Indien behalve verticale cracking ook horizontale cracking in een laag moet worden voorkomen, moet voor de overdruk op ieder punt in de laag gelden:

$$P_{cap}(h) < \Delta P(h_{inj}) - P_{wrv}(h_{inj} \rightarrow h) < 0,6 \cdot P_{ksp}(h)$$

Het optreden van cracking kan worden afgelezen in diagrammen. Een kenmerkend diagram is weergegeven in figuur 6. De wijze waarop de diagrammen kunnen worden geconstrueerd, is beschreven in 4.1.

3.3 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 5.

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.

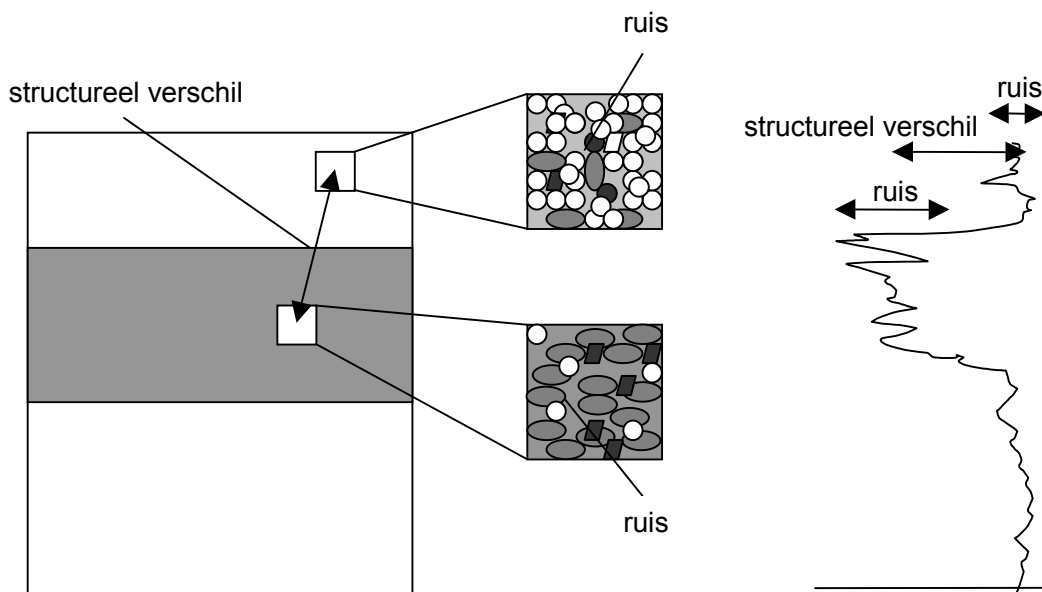


Fig. 5. Verdeling van verschillen in bodemkwaliteit over structurele verschillen tussen lagen en random verschillen binnen lagen.

Variantie

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 wat een eenheid is en welke eenheden gezamenlijk de populatie vormen.

De eenheden zullen doorgaans de grootte hebben van een gedeelte van de bodem waarin of waaraan 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. 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 onderscheiden op basis van structurele verschillen tussen deelpopulaties die eenduidig te definiëren, aaneengesloten bodemgedeelten vormen. 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 gegroepede eenheden aan een specifieke plek binnen de laag kan worden toegerekend. Zij vormen dan random aanwezige heterogeniteiten binnen de laag die op hun beurt, evenals de resterende 'bulk', op kleinere schaal ook weer heterogeen zijn.

UITWERKING VAN HET DENKKADER

4.1 Krijg ik lucht in de bodem? Intreedruk en cracking

Of lucht in de bodem kan worden geïnjecteerd, hangt af van de verhouding tussen de benodigde intreedruk en de druk waarbij horizontale en verticale cracking optreedt.

Intreedruk

De capillaire druk op de injectiediepte is de intreedruk. De intreedruk is de overdruk die nodig is om lucht in de bodem te krijgen. Het is de druk waarbij het (lucht)debiet voor het eerst groter wordt dan nul:

$$P_{\text{int}} = P_{\text{cap}}(h_{\text{inj}}) + \lim_{(Q \downarrow 0)} P_{\text{vpl}}$$

De intreedruk kan worden vastgesteld door de druk in een injectielans langzaam op te voeren en de druk vast te stellen waarbij voor het eerst stroming van lucht meetbaar is. De meting van de intreedruk is gevoelig voor de nauwkeurigheid van de debietmeter. Veelal zijn de in de praktijk gangbare debietmeters voor debieten van enkele tientallen kubieke meters per uur daarvoor ongeschikt. Bij gebruik van nauwkeuriger meters bij lagere debieten moet echter worden gewaarsborgd dat de weerstand van de debietmeter niet bepalend is voor de drukval in het systeem en daarmee voor de vastgestelde 'intreedruk'.

De intreedruk kan ook worden afgeleid uit de Qh-kromme. De afleiding berust op hetzelfde principe als de directe meting. Er wordt echter niet één combinatie van druk en debiet (de combinatie met de laagste waarden) beschouwd maar een serie combinaties, waarbij de intreedruk wordt bepaald door extrapolatie naar de druk waarbij het debiet nihil is ($\lim_{(Q \downarrow 0)}$).

De Qh-kromme kan worden gemeten maar ook theoretisch worden afgeleid aan de hand van de Wet van Ergun en met gebruikmaking van de $P_c S_w$ -curve. Op deze afleiding wordt ingegaan in 4.3.

Indien de Qh-kromme wordt gemeten, geldt evenals bij de directe vaststelling, dat de metingen moeten worden uitgevoerd met een debietmeter die één of meer orden van grootte kleiner kan meten dan de in de praktijk gangbare debieten omdat het begintraject van de Qh-kromme veelal een afwijkende tendens vertoont.

Tenslotte kan de intreedruk worden geschat uit de $P_c S_w$ -curve. Er moet dan bekend zijn bij welke luchtverzadiging van de bodem lucht meetbaar c.q. in relevante mate gaat stromen. Clayton [1996a] noemt daarvoor luchtverzadigingen van 2 % (van het poriënvolume) voor leemarm grof zand tot 16 % voor lemig materiaal. Een overzicht van geschatte intreedrukken op basis van $P_c S_w$ -curven van de meest voorkomende grondsoorten is weergegeven in tabel 1. De luchtverzadigingen, die in de betreffende grondsoorten minimaal noodzakelijk zijn verondersteld voor het optreden van luchtstroming, zijn als index achter de P_c -waarde aangegeven. P_{c2} betekent derhalve dat als intreedruk de capillaire druk is gesteld die in de betreffende grondsoort nodig is om 2 % van de poriën open te drukken. Voor een beschrijving van de gebruikte $P_c S_w$ -curven wordt verwezen naar de rapportage inzake "Zonering".

Tabel 1. 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	kleilig veen	P _{c30}	4669	-	3000	5000
20	veen	P _{c30}	-	493	400	800

Crackingdruk

De korrelspanning is het verschil tussen de grondspanning en de hydrostatische druk. De grondspanning wordt berekend aan de hand van de massa van de bovenliggende grondlaag:

$$P_{\text{gsp}} = \rho_{\text{bodem}} \cdot g \cdot \frac{h}{100}$$

waarin:

- P_{gsp} is de grondspanning (mbar);
- ρ_{bodem} is de soortelijke massa van de bovenliggende laag (kg/m³);
- g is de versnelling van de zwaartekracht (m/s²);
- h is de dikte van de bovenliggende laag (m);
- 100 is de omrekeningsfactor van Pa naar mbar.

De hydrostatische druk wordt op overeenkomstige wijze uit de massa van de bovenstaande waterkolom berekend:

$$P_{\text{hyd}} = \rho_{\text{hyd}} \cdot g \cdot \frac{h_{\text{gws}}}{100}$$

waarin:

- P_{hyd} is de hydrostatische druk (mbar);
- ρ_{hyd} is de soortelijke massa van water (kg/m³);
- h_{gws} is de diepte ten opzichte van de grondwaterspiegel (m).

De horizontale crackingdruk wordt verkregen door de grondspanning te vermenigvuldigen met een factor 0,6 (zie 3.2).

De intreedruk kan aan de hand van tabel 1 worden geschat uit de grondsoort of in het veld worden gemeten.

Een voorbeeld van een diagram, waarin de korrelspanning, de intreedruk en de horizontale crackingdruk zijn gepresenteerd, is voor de locatie Deventer B weergegeven in figuur 6.

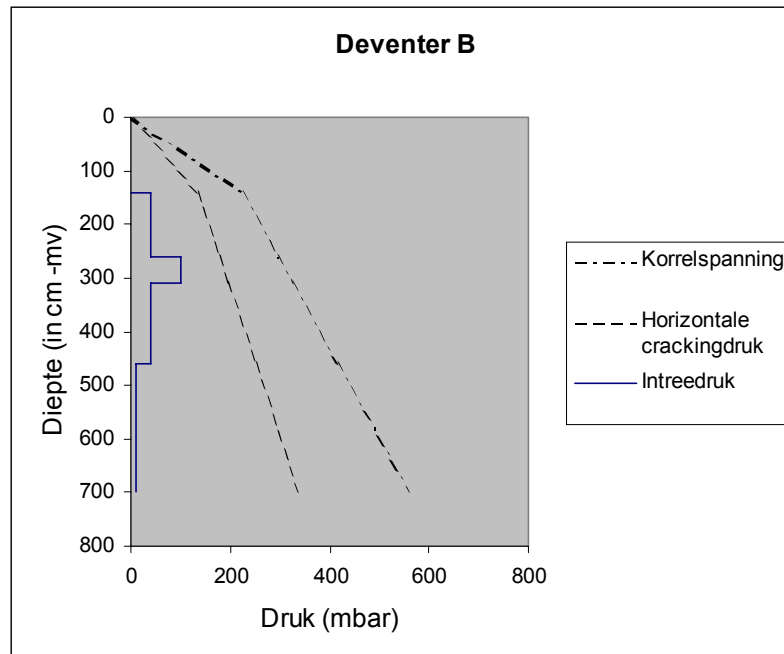


Fig. 6. Diagram voor het beoordelen van de marge tussen intreedruk en crackingdruk.

Aan de hand van een diagram, zoals in figuur 6, kan de primaire vraag worden beantwoord of persluchtinjectie mogelijk is. Dat wil zeggen of in de maatgevende laag een overdruk kan worden gerealiseerd die groter is dan de intreedruk maar kleiner is dan de horizontale crackingdruk. Indien dit niet het geval is, is persluchtinjectie op de locatie niet toepasbaar.

4.2 Gaat de lucht waarheen ik wil? Heterogeniteitsindexen

4.2.1 *Dispersie en schaduwzones*

Lagen, heterogeniteiten maar ook de verschillen tussen elementaire (meet)eenheden binnen een 'homogene' laag hebben invloed op de plekken in de bodem waar het effect van persluchtinjectie merkbaar is. De effecten worden onderscheiden naar het optreden van dispersie en het ontstaan van schaduwzones.

Geen enkele gelaagdheid in de bodem is zuiver homogeen. Alleen al door het verschil tussen de bodemdeeltjes en ruimte tussen de bodemdeeltjes zijn verschillen aanwezig. De aard van deze verschillen bepaalt onder andere de mate waarin luchtbelletjes tijdens hun in beginsel opwaarts gerichte stroming zijwaarts worden afgebogen.

Omdat de verschillen tussen de elementaire meeteenheden per definitie slechts als ruis kunnen worden weergegeven, is de mate van zijwaartse afbuiging stochastisch van aard en uit zich deze als een dispersie-effect. Naarmate de zijwaartse component groter is, verbreedt zich de doorstroomde bodemconus en neemt de straal van het door persluchtinjectie beïnvloede gebied toe.

Lagen met een (structureel) kleinere doorlatendheid kunnen een deel van de bodem afschermen. Evenzo kunnen heterogeniteiten met een (structureel) kleinere doorlatendheid een

deel van een bodemlaag afschermen. Boven deze lagen en heterogeniteiten ontstaan dan schaduwzones. Afhankelijk van de opvolging van schaduwzones kunnen de luchtbanen dan ook in een bepaalde richting worden gedwongen, waardoor een gerichtheid van de luchtstroming ontstaat. Bij lagen kan deze gerichtheid veelal worden ingeschat omdat de ligging ervan bekend is. Bij heterogeniteiten is de ligging niet bekend maar kan alleen een kans op de aanwezigheid ervan worden aangegeven. Als gevolg daarvan is de gerichtheid dan ook stochastisch van aard, waardoor de luchtstroming meer of minder onvoorspelbaar wordt. Naarmate de onvoorspelbaarheid groter is, is persluchtinjectie als saneringsvariant minder aantrekkelijk.

Om de mate van dispersie en de kans op het ontstaan van schaduwzones te kunnen inschatten, moeten bodemlagen dus worden gekarakteriseerd naar de verhouding tussen de horizontale en verticale doorlatendheid en naar de mate waarin heterogeniteiten met een relevante, afwijkende doorlatendheid in de laag voorkomen. Van de heterogeniteiten moeten tevens de afmetingen bekend zijn.

Heterogeniteiten hebben niet alleen tot gevolg dat zich daarboven zones bevinden die niet rechtstreeks door de lucht worden beïnvloed, maar ook dat daaronder een sterkere horizontale verspreiding optreedt. De straal van het beïnvloedingsgebied hangt daardoor meer af van de aanwezigheid en de aard van eventuele heterogeniteiten dan van de injectiediepte. Indien de verontreiniging, die met perslucht moet worden bereikt, zich in een laag met veel slecht doorlatende heterogeniteiten bevindt, is het raadzaam om, indien de benodigde intreedruk kan worden geleverd en geen cracking optreedt, niet ónder maar ín deze laag te injecteren, desnoods op verschillende diepten. Het afscherpende effect van de heterogeniteiten zorgt er dan voor dat de verontreiniging wordt bereikt.

4.2.2 *Random walkmodel*

Voor het beschrijven van de stroming van lucht door de bodem bestaan reeds modellen. Het nadeel van deze modellen is dat zij veelal rekenen met homogeen veronderstelde lagen. Heterogeniteit zou, ook als stochastisch fenomeen, in principe wel in deze modellen kunnen worden ingebouwd, maar leidt op de gedetailleerde schaal, zoals die voor het beschrijven van imbibitie en drainage nodig is, tot een in de praktijk vooralsnog onwerkbaar grote computercapaciteit en rekentijd. In werkelijkheid is echter nooit sprake van homogene pakketten en belangrijke afwijkingen tussen saneringsresultaat en voorspelling worden regelmatig aan 'de heterogeniteit' van de bodem toegeschreven. Juist omdat ten aanzien van luchtstroming kleine heterogeniteiten al storend kunnen werken, c.q. van invloed kunnen zijn, is het met name bij het ontwerp van persluchtinjectiesystemen van belang de invloed van bodemheterogeniteit goed in te kunnen schatten.

Het implementeren van bodemheterogeniteit in bestaande procesmatige modellen is zeer complex, met name doordat over de exacte aard van de processen nog discussie bestaat. In "Imbibitie en drainage" is daarom voor een andere benadering gekozen. Deze benadering pretendeert niet het gedrag van perslucht te beschrijven maar slechts het effect van bodemheterogeniteit op de voorspelling daarvan. Dit gebeurt aan de hand van een random walkmodel. Het random walkmodel beschrijft niet de exacte weg die de lucht in de bodem aflegt maar geeft een beeld van de variatie in de wegkeuze van de lucht waarmee rekening moet worden gehouden. De nadruk van het model ligt niet op de fysische aard van het stromingsgedrag maar op de stochastische aard. Diverse operationele parameters, zoals horizontale en verticale doorlatendheid, hoeven daardoor ook niet exact bekend te zijn maar slechts in min of meer juiste onderlinge verhoudingen en in relatie tot hun intrinsieke variabiliteit te kunnen worden ingeschat.

In het random walkmodel wordt lucht verondersteld zich in opwaartse richting te bewegen maar daarbij 'random' een horizontale afwijking naar rechts of naar links te krijgen. De grootte van de

horizontale verplaatsing ten opzichte van de verticale verplaatsing hangt af van de verhouding tussen de horizontale en de verticale doorlatendheid. De nieuwe positie van een luchtbel wordt beschreven door:

$$x_1 = x_0 + \text{random} \cdot K_h$$

en: $z_1 = z_0 + K_v$

waarin:

- x_1 is de x-coördinaat van de nieuwe positie van de luchtbel;
- x_0 is de x-coördinaat van de oude positie van de luchtbel;
- random is de aselekt gekozen waarde uit een uniforme verdeling tussen 0 en 1;
- K_h is de horizontale doorlatendheid;
- z_1 is de z-coördinaat van de nieuwe positie van de luchtbel;
- z_0 is de z-coördinaat van de oude positie van de luchtbel;
- K_v is de verticale doorlatendheid.

De verhouding tussen de horizontale en de verticale doorlatendheid wordt weergegeven door de verhoudingsfactor D:

$$D = \frac{K_h}{K_v}$$

waarin:

D is de verhoudingsfactor tussen de horizontale en de verticale doorlatendheid.

Een indicatie van horizontale doorlatendheden en verhoudingsfactoren voor de meest algemeen in Nederland voorkomende grondsoorten is gegeven in tabel 2.

Tabel 2. Richtwaarden voor de horizontale doorlatendheid (K_h in m/dag) en de doorlatendheidsverhouding (D).

code	grondsoort	horizontale doorlatendheid		doorlatendheidsverhouding	
		minimum	maximum	minimum	maximum
1	grind met grof zand	10	50	1	2
2	grind met fijn zand	10	50	1	2
3	grindhoudend, grof zand	5	20	2	5
4	grindhoudend, fijn zand	5	20	2	5
5	grof zand	5	20	2	10
6	fijn zand	1	5	5	10
7	zwak lemig grof zand	0,5	2	5	10
8	zwak lemig fijn zand	0,5	2	5	10
9	sterk lemig zand	0,1	0,5	10	100
10	zandige leem	0,05	0,2	10	100
11	lichte zavel	0,05	0,2	100	1000
12	zware zavel	0,01	0,05	1000	10000
13	venig zand	0,5	1	10	100
14	zandig veen	0,1	0,5	100	1000
15	leem	0,01	0,05	100	1000
16	lichte klei	0,005	0,02	1000	10000
17	zware klei	0,001	0,005	10000	100000
18	venige klei	0,005	0,02	1000	10000
19	kleilig veen	0,01	0,05	1000	10000
20	veen	0,02	0,1	100	1000

Luchtbellen kiezen de weg van de minste weerstand. Dit betekent dat zij slecht doorlatende lagen in beginsel vermijden. Indien een laag slechts een iets minder goede doorlatendheid heeft, kunnen zij deze veelal echter wel binnendringen. In het random walkmodel is de voorkeur voor goed doorlatende lagen, en de potentie om iets minder goed doorlatende lagen toch nog te kunnen binnendringen, verwerkt door een procedure op te nemen waarin de horizontale doorlatendheid voor iedere nieuwe positie van de lucht wordt vergeleken met de horizontale doorlatendheid van de positie waar de lucht vandaan is gekomen. Indien de doorlatendheid op de nieuwe plek meer dan een factor '100' kleiner is dan de doorlatendheid van de 'oude' plek wordt de verplaatsing niet uitgevoerd en stagneert de lucht. De factor '100' is arbitrair gesteld. De waarde wordt in belangrijke mate bepaald door de waarden zoals die in tabel 2 zijn aangegeven. Hierin verschillen 'opvolgende' grondsoorten veelal een factor '10'. Een kleinere waarde dan '100' zou dan onneembare barrières simuleren tussen deze grondsoorten, bijvoorbeeld tussen leemarm en zwak lemig zand of tussen sterk lemig zand en zandige leem. Dit is niet als reëel verondersteld. Een factor '100' lijkt hieraan vooralsnog meer recht te doen.

De 'wegkeuze' van de lucht in het random walkmodel wordt gevoed door de positionering van bodemlagen en de toekenning van K_h - en D-waarden daaraan. Hiervoor wordt het stochastische model gebruikt zoals dat voor de heterogeniteit is beschreven in 3.3. Lagen worden daarin verondersteld structureel verschillende K_h - en D-waarden te bezitten. Binnen de lagen variëren de waarden ook, waarbij deze variatie eventueel in clusters gegroepeerd kan zijn. Deze random aanwezige clusters vormen heterogeniteiten.

In dit concept leidt de bodemschematisatie tot het definiëren van de ligging van één of meer lagen, waarbinnen voor ieder punt een random keuze wordt gedaan van een K_h - en een D-waarde uit een tevoren, voor de betreffende laag gedefinieerd waardentraject. Daarnaast wordt, afhankelijk van de heterogeniteitsdichtheid, het aantal heterogeniteiten binnen de laag vastgesteld. De ligging van deze heterogeniteiten wordt weer random gekozen. De heterogeniteitsdichtheid H (het aantal heterogeniteiten per oppervlakte-eenheid) is een karakteristiek van de betreffende laag en kan door middel van trajectdifferentiatie worden bepaald. Indien geen trajectdifferentiatie is uitgevoerd, moet de 'heterogeniteit' op enigerlei andere wijze worden ingeschat. Vaak komt dit neer op 'gevoel' of 'expert judgement' van de saneringsdeskundige. De werkwijze voor trajectdifferentiatie is beschreven in het deelrapport inzake "Zonering".

De ligging van de heterogeniteiten in de laag wordt in het random walkmodel gekozen als:

$$X_{\text{het}} = X_{\text{laag, begin}} + \text{random} \cdot (X_{\text{laag, eind}} - X_{\text{laag, begin}})$$

$$Z_{\text{het}} = Z_{\text{laag, begin}} + \text{random} \cdot (Z_{\text{laag, eind}} - Z_{\text{laag, begin}})$$

waarin:

X_{het}	is de x-coördinaat van het beginpunt van de heterogeniteit;
$X_{\text{laag, begin}}$	is de x-coördinaat van het beginpunt van de laag;
$X_{\text{laag, eind}}$	is de x-coördinaat van het eindpunt van de laag;
Z_{het}	is de z-coördinaat van het beginpunt van de heterogeniteit;
$Z_{\text{laag, begin}}$	is de z-coördinaat van het beginpunt van de laag;
$Z_{\text{laag, eind}}$	is de z-coördinaat van het eindpunt van de laag.

De heterogeniteiten worden in de eerste plaats gekarakteriseerd door de dikte en de lengte ervan. De dikte wordt opnieuw random gekozen uit een tevoren, voor de heterogeniteiten in de betreffende laag, gedefinieerd waardentraject. De lengte wordt vervolgens uit de gekozen dikte afgeleid als opnieuw een random keuze uit het waardentraject van één tot twee keer de gekozen

dikte. De inschatting van de lengte is nodig om niet alleen in verticale richting (aantal per meter bodemprofiel) maar ook in horizontale richting een kansdichtheid van de heterogeniteiten aan te kunnen geven (aantal per vierkante meter dwarsdoorsnede) en van daaruit ook voor een dwarsprofiel de invloed van de aanwezigheid van heterogeniteiten te kunnen inschatten, c.q. met het random walkmodel te kunnen doorrekenen:

$$d = d_{\min} + \text{random} \cdot (d_{\max} - d_{\min})$$

$$l = d \cdot (1 + \text{random})$$

waarin:

d is de dikte van de heterogeniteit;
 d_{\min} is de minimale waarde van het bereik aan heterogeniteitsdikten;
 d_{\max} is de maximale waarde van het bereik aan heterogeniteitsdikten;
 l is de lengte van de heterogeniteit.

In de tweede plaats worden de heterogeniteiten gekarakteriseerd door de K_h - en D -waarden. Evenals voor de lagen gebeurt dit door een random keuze van een K_h - en een D -waarde voor ieder punt in de heterogeniteit uit voor de heterogeniteiten in de betreffende laag gedefinieerde waardentrajecten:

$$K_h = K_{h, \min} + \text{random} \cdot (K_{h, \max} - K_{h, \min})$$

$$D = D_{\min} + \text{random} \cdot (D_{\max} - D_{\min})$$

waarin:

$K_{h, \min}$ is de minimale waarde van het bereik aan horizontale doorlatendheidswaarden;
 $K_{h, \max}$ is de maximale waarde van het bereik aan horizontale doorlatendheidswaarden;
 D_{\min} is de minimale waarde van het bereik aan doorlatendheidsverhoudingen;
 D_{\max} is de maximale waarde van het bereik aan doorlatendheidsverhoudingen.

Evenals de heterogeniteitsdichtheid kan het waardentraject voor de dikte van de heterogeniteiten door middel van trajectdifferentiatie uit sondeergegevens worden bepaald. Indien geen sondeergegevens voorhanden zijn, of geen trajectdifferentiatie is uitgevoerd, moeten de waardentrajecten aan de hand van 'gewone' bodembeschrijvingen worden ingeschat.

4.3 Hoeveel, waar en hoe? Drukken, debieten, invloedsgebieden en luchtverzadigingen

Druk en debiet zijn twee belangrijke parameters voor het ontwerpen en dimensioneren van een persluchtinjectiesysteem. De druk is belangrijk omdat die vaak bepalend is of toepassing van perslucht wel of niet mogelijk is. Het debiet is vooral van belang in verband met de saneringsduur. De relatie tussen druk en debiet bij een persluchtinjectiesystemen in de bodem kan worden beschouwd naar analogie van een pomp. Van een pomp is bekend dat druk en debiet elkaar wederzijds beïnvloeden. De relatie wordt weergegeven door de Q_h -kromme. Daarnaast geldt dat een pomp een beperkt vermogen heeft dat of voor druk of voor debiet kan worden aangewend. Des te meer debiet gewenst is, des te minder druk geleverd kan worden.

De druk die bij een bepaald debiet wordt bereikt, hangt af van de wrijving van de lucht in het bodemsysteem. Deze is op zijn beurt afhankelijk van de afgelegde weg. Naarmate de afgelegde

weg langer is en de poriën, waardoor de stroming plaatsvindt, nauwer zijn, zijn de wrijvingsverliezen groter en is daarmee ook de drukval in het systeem groter.

Lucht gedraagt zich in de bodem niet veel anders dan in een leidingsysteem waarbij de poriën, waardoor de lucht stroomt, gezien kunnen worden als een complex leidingsysteem. De complexiteit van dit bodemleidingsysteem is groot omdat de leidingen allerlei vertakkingen hebben en van verschillende grootte zijn. Daarbij komt dat het aantal leidingen en de grootte ervan niet vast is maar afhankelijk is van druk, debiet en bodemtype.

Persluchtinjectie in de verzadigde zone gaat gepaard met het verdringen van water. Door water te verdringen ontstaan er luchtkanalen in de bodem. Lucht kiest hierbij de weg van de minste weerstand. Bij voorkeur zal de lucht proberen om via de grootste poriën te stromen, omdat voor het verdringen van water uit de grote poriën de minste druk nodig is.

Hoewel de wrijving in grote poriën relatief klein is, ontstaat ook in een systeem van aaneengesloten grote poriën een drukval die groter is naarmate ook het debiet toeneemt. Indien er veel lucht door de (grote) poriën wordt gepompt, zal op een bepaald moment de druk in de lucht zodanig toenemen dat de lucht ook water uit kleinere poriën kan verdringen.

De relatie tussen de druk en de waterverzadiging in de poriën is voor een groot aantal bodemtypen experimenteel bepaald en wordt weergegeven in zogenaamde $P_c S_w$ -curven. Hierin zijn de capillaire druk en de waterverzadiging tegen elkaar uitgezet. $P_c S_w$ -curven kunnen met functies worden beschreven. Eén van die functies is de Van Genuchten-saturatiefunctie:

$$P_c = \frac{\rho_l g}{\alpha} \left(\frac{1}{S_{el}^{\frac{1}{m}}} - 1 \right)^{\frac{1}{n}}$$

met:

$$S_{el} = \frac{S_l - S_r}{1 - S_r}$$

$$m = 1 - \frac{1}{n}$$

waarin:

- P_c is de capillaire spanning (Pa);
- S_{el} is de effectieve saturatie van de waterfase;
- S_l is de saturatie van de waterfase;
- S_r is de residuaire saturatie;
- ρ_l is de soortelijke massa van de waterfase (kg/m^3);
- g is de zwaartekrachtversnelling;
- α is de Van Genuchten-saturatiefunctie parameter (1/m);
- m, n is de Van Genuchten-saturatiefunctie parameters.

De relatie tussen druk en debiet kan op verschillende manieren worden benaderd. De meest eenvoudige is die via de Wet van Darcy. De Wet van Darcy beschrijft de relatie tussen druk en waterstroming voor beperkte stroomsnelheden. Omdat dit voor lucht niet (altijd) het geval is, kan voor de stroming van lucht door de bodem beter gebruik worden gemaakt van de Wet van Ergun.

De Wet van Ergun beschrijft de drukval bij stroming van lucht door gepakte bedden en is toepasbaar voor alle stroomsnelheden:

$$\frac{P_0 - P_L}{L} = \frac{150 \cdot \mu \cdot v_0}{D_p^2} \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} + \frac{1,75 \cdot \rho \cdot v_0^2}{D_p} \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3}$$

waarin:

- P_0 is de druk bij de ingang (Pa);
- P_L is de druk op punt L van het injectiepunt (m);
- L is de afgelegde weg (m);
- μ is de viscositeit van lucht (cp);
- v_0 is de superficiële snelheid (m/s);
- D_p is de diameter van deeltjes (m);
- ε is de doorstroomde fractie;
- ρ is de dichtheid van lucht (kg/m³).

De Wet van Ergun kan op de verzadigde zone worden toegepast door deze modelmatig te benaderen als een doorstroomde buis. De straal van de buis is dan gelijk aan de invloedsstraal van de persluchtinjectie.

De superficiële snelheid is de snelheid die de lucht zou hebben indien het volledige volume van de bodem beschikbaar zou zijn voor stroming. De superficiële snelheid kan worden berekend door het debiet te delen door het oppervlak van de doorstroomde bodem:

$$v_0 = \frac{Q}{\pi \cdot r^2 \cdot B \cdot C}$$

waarin:

- Q is het debiet;
- r is de straal van de doorstroomde poriën;
- B is de correctiefactor voor het doorstroomde oppervlak;
- C is de correctiefactor voor de vorm van de conus.

In figuur 7 is aangegeven dat niet het gehele bodemvolume maar slechts een aantal luchtkanalen worden doorstroomd. Modelmatig kunnen deze worden gezien als een aantal kleinere buisjes in een grote buis. Het modelmatig doorstroomde volume moet dan voor het werkelijk doorstroomde oppervlak worden gecorrigeerd. Hiervoor wordt de correctiefactor B gebruikt die een waarde heeft tussen 0 en 1. In figuur 7 is tevens te zien dat het werkelijk doorstroomde bodemvolume een conusachtige vorm heeft en daarmee kleiner is dan de gemodelleerde buis. De straal op het injectiepunt is kleiner dan de straal op de grondwaterspiegel. Om voor de vorm van de conus te corrigeren wordt de correctiefactor C gebruikt die eveneens een waarde heeft tussen 0 en 1.

Vooralsnog zijn de correctiefactoren B en C arbitrair op 0,5 gesteld. De validiteit hiervan zal door evaluatie van praktijkgegevens moeten blijken!

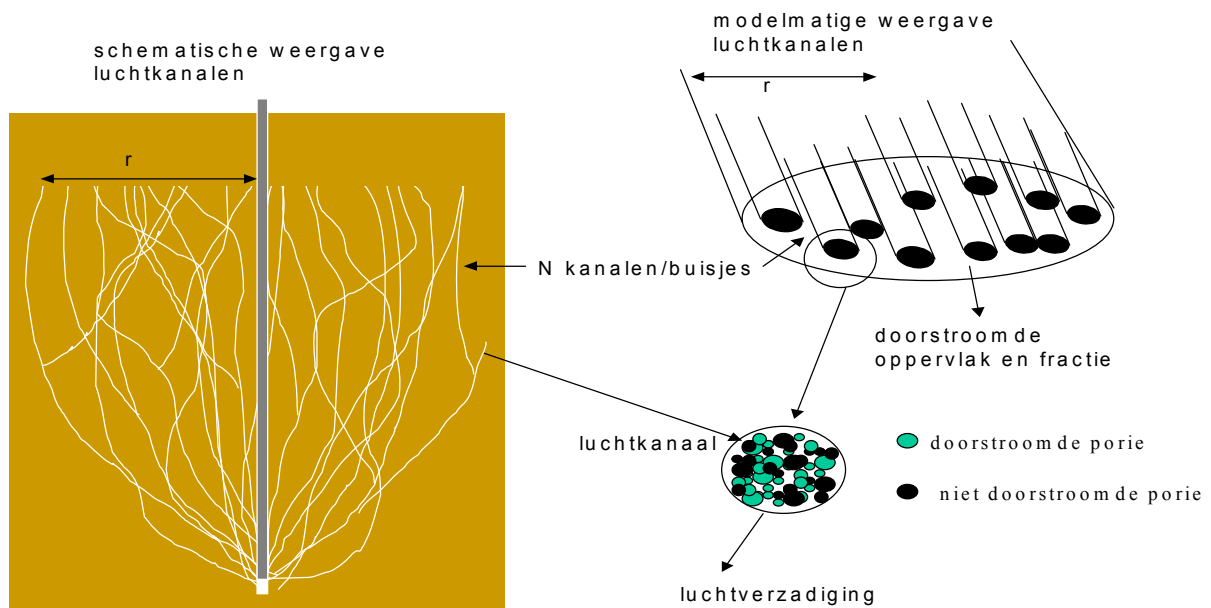


Fig. 7. Systeem van luchtkanalen in de bodem.

Voor ieder persluchtinjectiesysteem kunnen de specifieke combinaties van druk, debiet, luchtverzadiging en invloedstraal via een iteratieproces uit de Van Genuchtenfunctie, de Wet van Ergun en de benadering voor de superficiële stroomsnelheid worden benaderd. Bij aanname van een injectiedebiet en een geschatte straal van het invloedsgedebied kan een superficiële snelheid worden berekend. Deze superficiële snelheid kan vervolgens via de Wet van Ergun worden gebruikt om de drukval te berekenen die op zijn beurt via de $P_c S_w$ -curve (Van Genuchten-saturatiefunctie) gerelateerd is aan een luchtgevuuld poriënvolume. Dit luchtgevuuld poriënvolume moet vervolgens weer aansluiten bij de eerder gedane aannamen ten aanzien van het doorstroomde bodemvolume bij de berekening volgens de Wet van Ergun. Uit de relaties tussen druk, debiet, straal van het doorstroomde bodemvolume en de luchtverzadiging blijkt dat bij een constant debiet de drukval bij het doorstromen van een bodemlaag door lucht zeer klein is. Dit komt doordat de extra overdruk in een luchtlichaam, die bij de stijging ontstaat, vooral leidt tot een toename van de luchtverzadiging en de straal en niet tot een toename van de verplaatsingsnelheid en daarmee van de wrijving. Het grotere volume, waarover het debiet wordt verdeeld, nivelleert de druk ($PV = \text{constant}$).

Het vrijwel gelijk blijven van de druk in de lucht (P_{lucht}) met toenemende hoogte in de bodem is voor een leemarm fijn zand en een sterk lemig zand geïllustreerd in de bovenste en onderste grafiek van figuur 8. De middelste grafiek laat voor het leemarm fijn zand zien dat de constante druk vooral het gevolg is van de toenemende straal van de conus en in mindere mate van de luchtverzadiging.

De geringe drukval binnen de lagen impliceert dat bij persluchtinjectie slechts een beperkte overdruk van enkele tientallen millibars hoeft te worden aangelegd ten opzichte van de druk die nodig is voor het verkrijgen van een gewenst debiet of een gewenste luchtverzadiging.

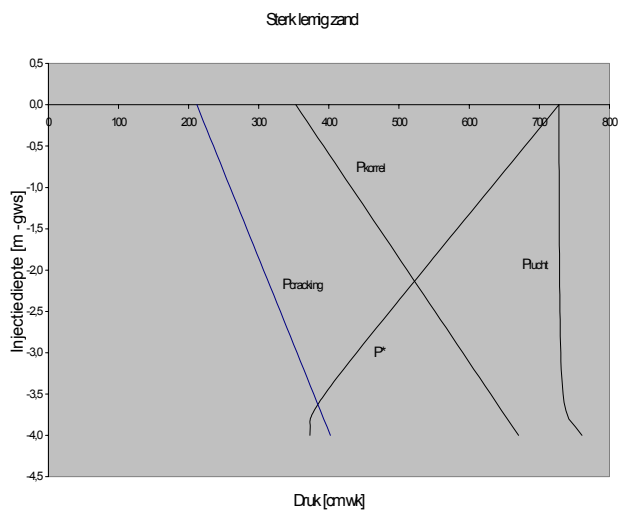
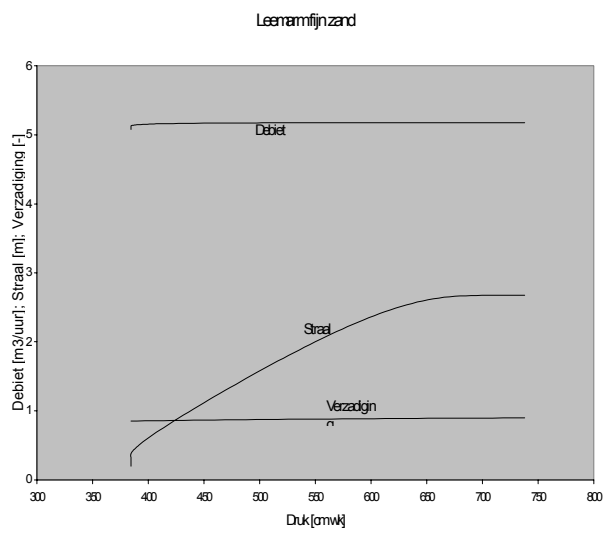
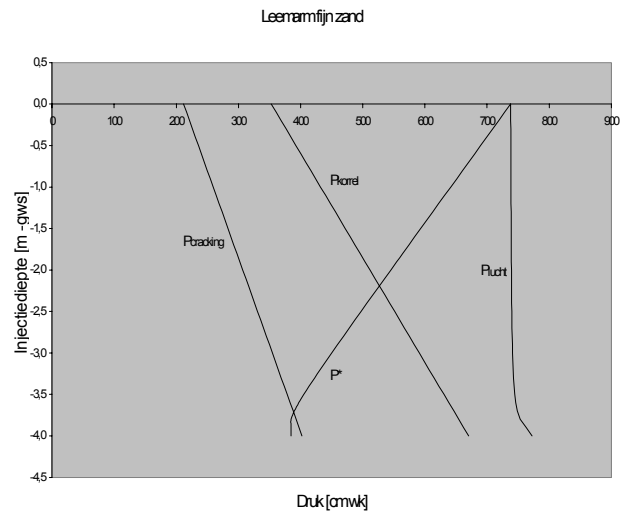


Fig. 8. Verloop van de druk in de bodem in een leemarm fijn zand en een sterk lemig zand (voor het leemarm fijn zand is tevens het verloop van het debiet, de straal van de conus en de luchtverzadiging in de poriën weergegeven).

HOOFDSTUK 5

PERSLUCHTPROEVEN

5.1 Locatie Deventer A

Bodemkarakterisatie

Op de locatie Deventer A zijn negen sonderingen uitgevoerd, waarbij per centimeter de conusweerstand en het wrijvingsgetal zijn vastgesteld. De sondeergegevens zijn door middel van 'trajectdifferentiatie' verwerkt. De werkwijze is beschreven in de rapportage inzake de cluster "Zonerings". Uit de trajectdifferentiatie volgt op basis van de negen profielen een indeling van de bodem in drie lagen. De classificatie van de afzonderlijke trajecten binnen de onderscheiden lagen is uitgevoerd aan de hand van de gemiddelden van de conusweerstand en het wrijvingsgetal. Dit is weergegeven in figuur 9.

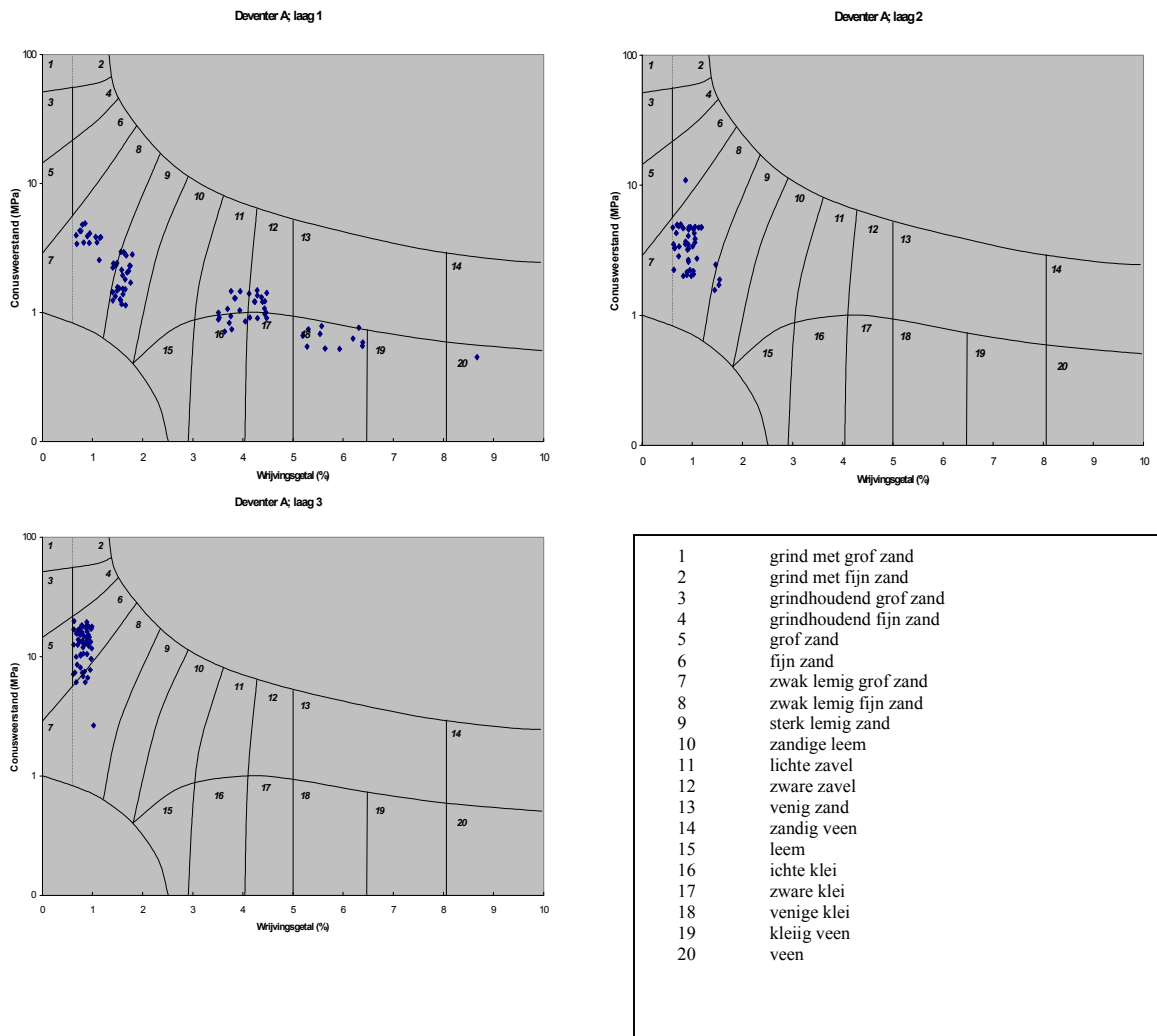


Fig. 9. Classificatie van de trajecten naar grondsoort op basis van de gemiddelden van conusweerstand en wrijvingsgetal voor locatie Deventer A.

Uit figuur 9 blijkt dat de trajecten in laag 1 deels uit (verschillende gradaties van) sterk (9) en zwak lemig zand (8) bestaan, deels uit lichte (11) of zware zavel (12) en lichte (16) of zware klei (17). De niet duidelijke dominantie van één van de grondsoorten maakt de keuze tussen een

karakterisatie van de laag als een (sterk) lemig zand met veel kleiige heterogeniteiten of als een (zware) zavel met veel zandige heterogeniteiten arbitrair. De trajecten in laag 2 bestaan voornamelijk uit zwak lemig zand (8). Vier trajecten bestaan uit sterk lemig zand (9) en één traject uit leemarm fijn zand (6). De trajecten in laag 3 bestaan vrijwel allemaal uit leemarm zand (6). Enkele trajecten zijn zeer zwak leemhoudend (8).

De lagen kunnen worden beschreven door de schematisatie zoals die in tabel 3 is vermeld. Onder de onverzadigde zone komen drie lagen voor, waarvan de 'bulk' hoofdzakelijk bestaat uit achtereenvolgens zware zavel, zwak lemig zand en leemarm fijn zand. De diepteligging van deze lagen vertoont een matige variatie. Met name de zavellaag is sterk heterogeen: de kans op het aantreffen van een heterogeniteit in deze laag bedraagt ruim 5 per m² dwarsdoorsnede. Dit betreft dan heterogeniteiten die beter doorlatend zijn dan de 'bulk' van de laag en die hier geschematiseerd zijn als sterk lemig zand. Ook de tweede laag onder de grondwaterspiegel is enigszins heterogeen. De derde laag is homogeen.

Tabel 3. Karakterisering van de bodemopbouw op locatie Deventer A.

laag	diepte (cm-mv)		intreedruk		heterogeniteiten	dikte		kansdichtheid
	van	tot	min.	max.		min.	max.	
onverzadigde zone	0	130	-	-	-	-	-	-
zware zavel	130	301 - 356	300	700	sterk lemig zand	10	30	5,56
zwak lemig zand	301 - 356	408 - 442	15	60	fijn zand	10	30	0,59
fijn zand	408 - 442	800	5	30	-	-	-	-

Krijg ik lucht in de bodem?

Op basis van de grondsoortclassificatie van de bulk (de laag) kunnen aan de hand van tabel 1 (zie 4.1) intreedrukken aan de betreffende lagen worden toegekend. Tevens kan aan de hand van de gemiddelde diepteligging van de lagen en de grondwaterstand het verloop van de grond-druk en de hydrostatische druk met de diepte worden berekend en kan het intreedruk-crackingdiagram worden geconstrueerd. Het diagram is in figuur 10 gepresenteerd.

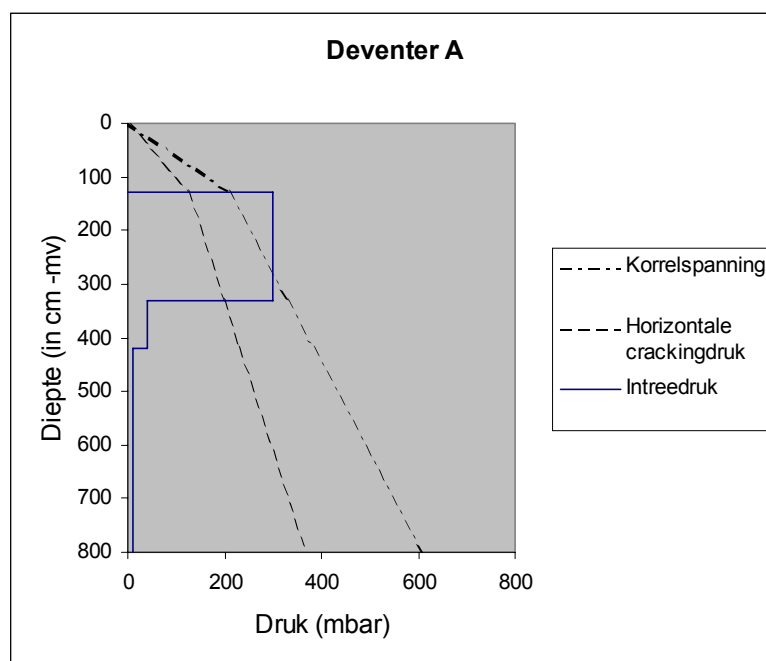


Fig. 10. Intreedruk-crackingdiagram voor de locatie Deventer A.

Het soms grote verschil tussen de minimale en de maximale waarde van de intreedruk voor een grondsoort, in dit geval zware zavel, maakt een zinvolle constructie van het diagram pas mogelijk nadat een nadere waarde binnen het aangegeven bereik is gekozen. Vooralsnog kan daarvoor slechts ervaring en 'expert judgement' worden gebruikt. Voor de locatie Deventer A kan voor de zavelige laag een waarde aan de onderzijde van het bereik worden verwacht vanwege de zeer veelvuldige aanwezigheid van zandige heterogeniteiten. De geschatte intreedruk van de zavelige laag is daarom op 300 mbar gesteld.

Uit figuur 10 volgt dat de eerste laag onder de grondwaterspiegel de meest kritische laag is en dat doorstroming van deze laag niet mogelijk is zonder cracking. Bij injectie onder deze laag met een druk die lager is dan de (horizontale) crackingdruk kan de lucht geen uitweg vinden door de laag en zal deze zich dus daaronder ophopen in de vorm van een luchtkussen.

Bij aanvang van de injectieproeven zijn van een aantal filters op locatie A de drukken bepaald waarbij voor het eerst sprake was van een meetbaar debiet. Op het meetsysteem en de nauwkeurigheden van de gebruikte debietmeters is ingegaan in bijlage A. De nauwkeurigheid van de gemeten intreedrukken wordt daarnaast ook bepaald door de meetprocedure waarbij de injectiedruk steeds met 30 mbar is verhoogd. De werkelijke druk waarbij voor het eerst stroming waarneembaar is, ligt derhalve in het traject tussen de hoogste druk waarbij nog geen stroming werd gemeten en de laagste druk waarbij dit wel het geval was. Grofweg kan worden gesteld dat de werkelijke intreedruk circa 30 mbar lager kan zijn dan in de proeven is vastgesteld. De resultaten van de intreedrukmetingen zijn opgenomen in bijlage C.

De gemeten intreedrukken voor de (zware) zavel varieerden van 271 tot 488 mbar. Deze waarden liggen in het bereik van P_{c30} -waarden zoals die ook als richtwaarden in tabel 1 (zie 4.1) zijn opgenomen. De spreiding tussen de gemeten waarden is vrij groot maar dit kan worden veroorzaakt door de aanwezigheid van meer en minder kleiïge delen. De verificatie van de richtwaarden in tabel 1 wordt gecompliceerd doordat het onderscheid tussen lichte en zware zavel en tussen lichte en zware klei op basis van sondeergegevens moeilijk te maken is, terwijl de P_c -waarden aanzienlijk kunnen verschillen.

Gaat de lucht waarheen ik wil?

De resultaten van de trajectdifferentiatie met betrekking tot de karakterisering van de bodem zijn ingevoerd in het random walkmodel. De uitkomsten van vier simulaties zijn weergegeven in figuur 11.

Uit figuur 11 blijkt dat de heterogeniteit van de laag met sterk lemig zand weinig invloed heeft op de voorspelbaarheid van het doorstromingseffect: alle simulatie-uitkomsten duiden op een slechte doorstroming van de zavelige laag. Omdat aannemelijk is dat juist in dit deel van de bodem - het meest slecht doorlatende gedeelte, net onder de grondwaterspiegel - zich een eventuele (olie)verontreiniging zou bevinden, is het effect van persluchtinjectie op deze locatie onzeker.

Op de locatie Deventer A zijn door sonderen veertien persluchtinjectiefilters luchtdicht in de bodem ingebracht. Elk van de filters kon zowel worden gebruikt als injectiepunt als dienst doen als meetpunt van druk. Daarvoor was ieder filter voorzien van een diver. Het meetsysteem is beschreven in bijlage A. Een overzicht van de ligging, diepte en lengte van de injectiefilters is gegeven in bijlage B.

Op locatie A zijn vijf proeven uitgevoerd. Een overzicht van de proeven en de injectieregimes die daarbij zijn gevoerd, is gegeven in bijlage D.

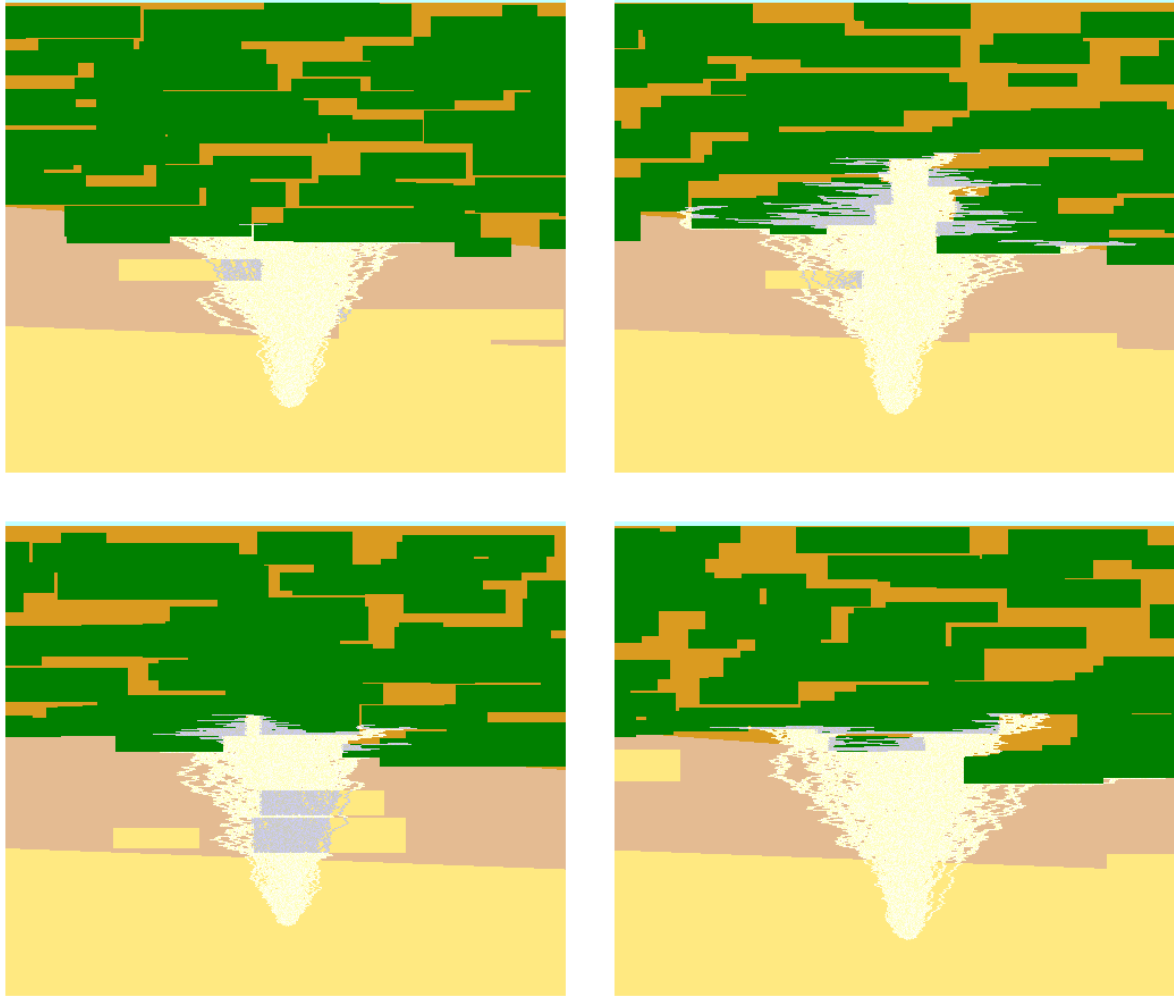


Fig. 11. Vier simulaties van het doorstromingsgedrag op locatie Deventer A.

De resultaten van de proeven zijn verwerkt in filmpjes waarop het drukverloop in het horizontale vlak per half uur wordt gepresenteerd. Vier beelden daarvan voor proef 4 zijn weergegeven in figuur 12. De filmpjes zijn beschikbaar op CD-rom. In bijlage D is een korte beschrijving van de filmpjes opgenomen.

Uit de filmpjes van de proeven op locatie A blijkt dat de drukveranderingen in de monitoringfilters erg klein zijn (minder dan 30 mbar) ondanks dat hoge drukken in de injectiefilters zijn gecreëerd. Voor de filters in het meest ondiepe horizontale vlak sluit dit aan bij de verwachting. Deze filters staan in de laag met sterk lemig zand en veel kleiige heterogeniteiten die een barrière vormt tegen de verplaatsing van de lucht. De filters, die in het midden van deze laag zijn geplaatst, zijn daardoor afgeschermd voor de drukveranderingen in de onderliggende laag. Dit afschermd effect komt ook naar voren in de simulatieplaatjes van figuur 11. Uit deze figuur blijkt dat de lucht alleen in de slecht doorlatende laag indringt op plaatsen waar de doorlatendheid lokaal kleiner is.

In de filters in het tweede vlak werden vooraf wel veranderingen in druk verwacht, met name als gevolg van de verplaatsing van lucht onder de slecht doorlatende laag. Drukveranderingen zijn echter slechts zeer beperkt waargenomen in twee filters. Na afloop van de proef bleken de filters in het tweede vlak niet diep genoeg te zijn geplaatst. Zij hebben daardoor vermoedelijk nog in de

onderzijde van de slecht doorlatende laag gestaan. Dit blijkt ook uit de hoge intreedrukken die in een aantal filters zijn gemeten.

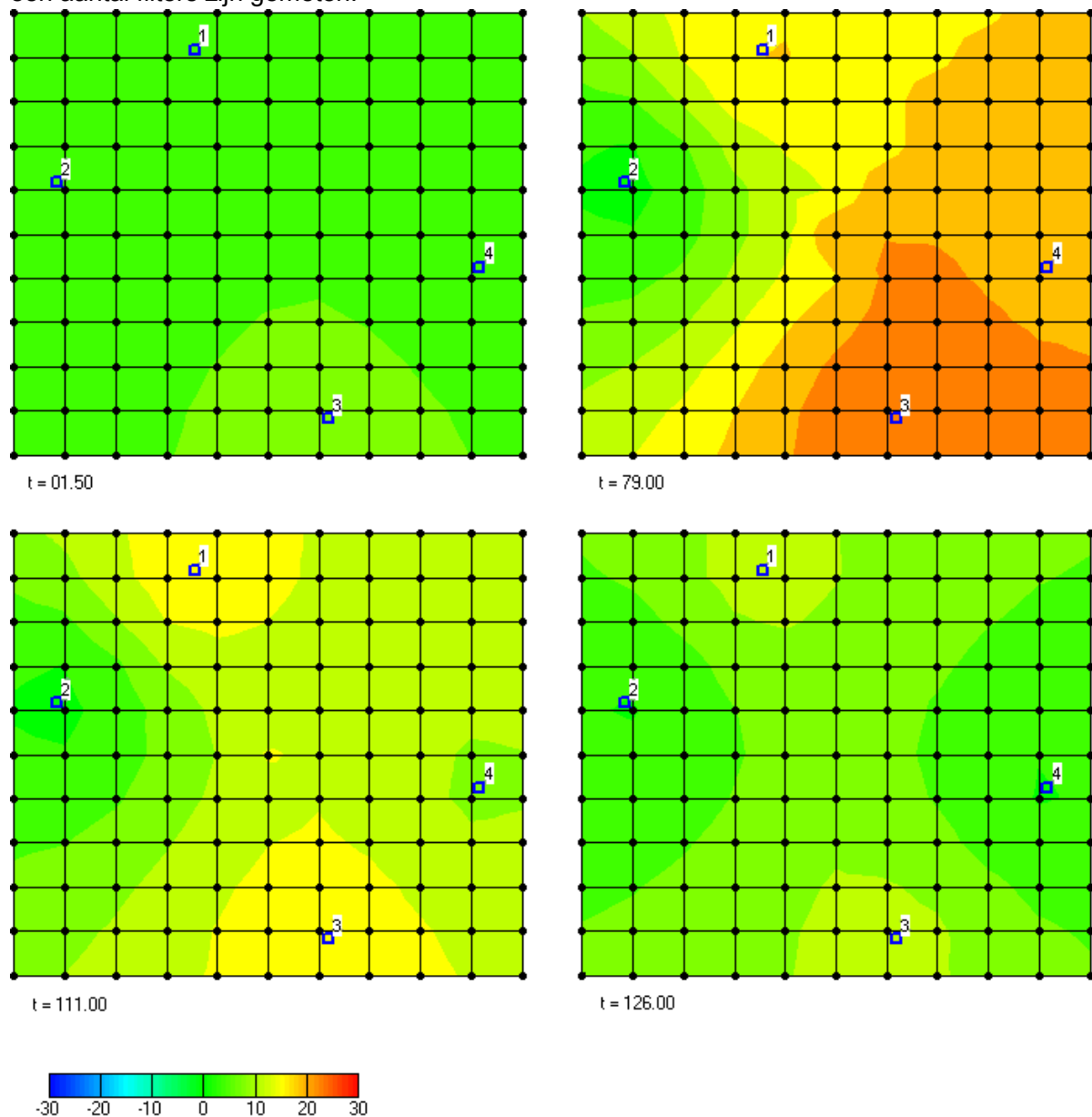


Fig. 12. Een viertal momentopnamen van het drukpatroon in het horizontale vlak tijdens de uitvoering van proef 4 op locatie A.

5.2 Locatie Deventer B

Op de locatie Deventer B zijn vijf sonderingen uitgevoerd, waarbij per centimeter de conusweerstand en het wrijvingsgetal zijn vastgesteld. De sondeergegevens zijn door middel van 'trajectdifferentiatie' verwerkt. De werkwijze is beschreven in de rapportage inzake de cluster "Zonering". Uit de trajectdifferentiatie volgt op basis van de vijf profielen een indeling van de bodem in vier lagen.

De aard van de trajecten in de vier lagen is weergegeven in figuur 13. Uit figuur 13 blijkt dat de trajecten in laag 1 voornamelijk uit (verschillende gradaties van) zwak lemig zand (8) bestaan. Twee trajecten zijn (zeer) sterk lemig (9) en één traject bestaat uit lichte klei (16). De trajecten in laag 2 beslaan een grote verscheidenheid aan grondsoorten. De laag bevat zowel zwak lemig

(8) en sterk lemig zand (9), zandige leem (10), lichte zavel (11) als venig zand (13). De trajecten in laag 3 bestaan vrijwel allemaal uit zeer zwak tot zwak lemig zand (8). Eén traject kan als sterk lemig (9) worden beschouwd. De trajecten in laag 4 bestaan uitsluitend uit leemarm zand (6).

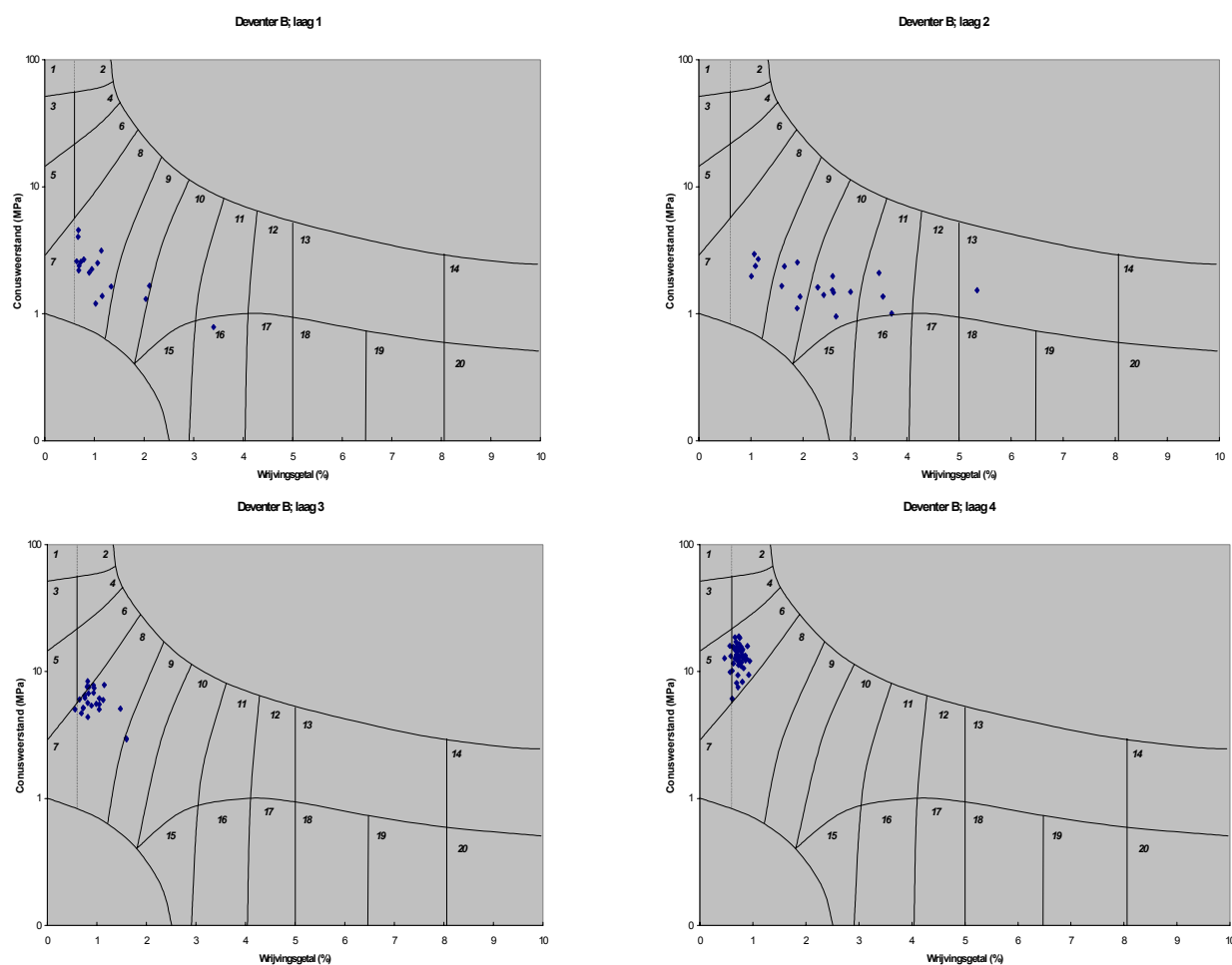


Fig. 13. Classificatie van de trajecten naar grondsoort op basis van de gemiddelden van conusweerstand en wrijvingsgetal voor locatie Deventer B.

De lagen kunnen worden beschreven door de schematisatie zoals die in tabel 4 is vermeld. Onder de onverzadigde zone komen vier lagen voor, waarvan de 'bulk' hoofdzakelijk bestaat uit achtereenvolgens zwak lemig zand, zandige leem, opnieuw zwak lemig zand en tenslotte leemarm fijn zand.

Tabel 4. Karakterisering van de bodemopbouw op locatie Deventer A.

laag	diepte (cm-mv)		intreedruk		heterogeniteiten	dikte		kansdichtheid
	van	tot	min.	max.		min.	max.	
onverzadigde zone	0	140	-	-	-	-	-	-
zwak lemig zand	130	251 - 274	15	60	zandige leem	4	6	1,03
zandige leem	251 - 274	308 - 313	100	500	sterk lemig zand	6	17	12,0
zwak lemig zand	308 - 313	437 - 484	15	60	sterk lemig zand	4	15	0,60
fijn zand	437 - 484	700	5	30	-	-	-	-

De diepteligging van deze lagen vertoont slechts een geringe variatie. Met name de tweede laag onder de grondwaterspiegel is sterk heterogeen: de kans op het aantreffen van een heterogeniteit in deze laag bedraagt 12,0 per m² dwarsdoorsnede. Het betreft in dit geval heterogeniteiten die beter doorlatend zijn dan de 'bulk' van de laag en die hier geschematiseerd zijn als sterk lemig zand. Ook de eerste en derde laag onder de grondwaterspiegel zijn enigszins heterogeen. Zij bevatten heterogeniteiten die slechter doorlatend zijn dan de bulk. De vierde laag kan als homogeen gelden.

Op basis van de grondsoortclassificatie van de bulk kunnen aan de hand van tabel 1 (zie 4.1) intreedrukken aan de betreffende lagen worden toegekend. Tevens kunnen aan de hand van de gemiddelde diepteligging van de lagen en de grondwaterstand het verloop van de gronddruk en de hydrostatische druk met de diepte worden berekend en kan het intreedruk-crackingdiagram, zoals dat eerder in 4.1 al is weergegeven, worden geconstrueerd. Het diagram is nogmaals in figuur 14 gepresenteerd.

Het soms grote verschil tussen de minimale en de maximale waarde van de intreedruk voor een grondsoort maakt een zinvolle constructie van een diagram pas mogelijk nadat een nadere waarde binnen het aangegeven bereik is gekozen. Vooralsnog kan daarvoor slechts ervaring en 'expert judgement' worden gebruikt. Voor de locatie Deventer B kan voor de zandige leemlaag een waarde aan de onderzijde van het bereik worden verwacht vanwege de zeer veelvuldige aanwezigheid van minder lemige heterogeniteiten (sterk lemig zand). De geschatte intreedruk voor deze laag is daarom op 100 mbar gesteld.

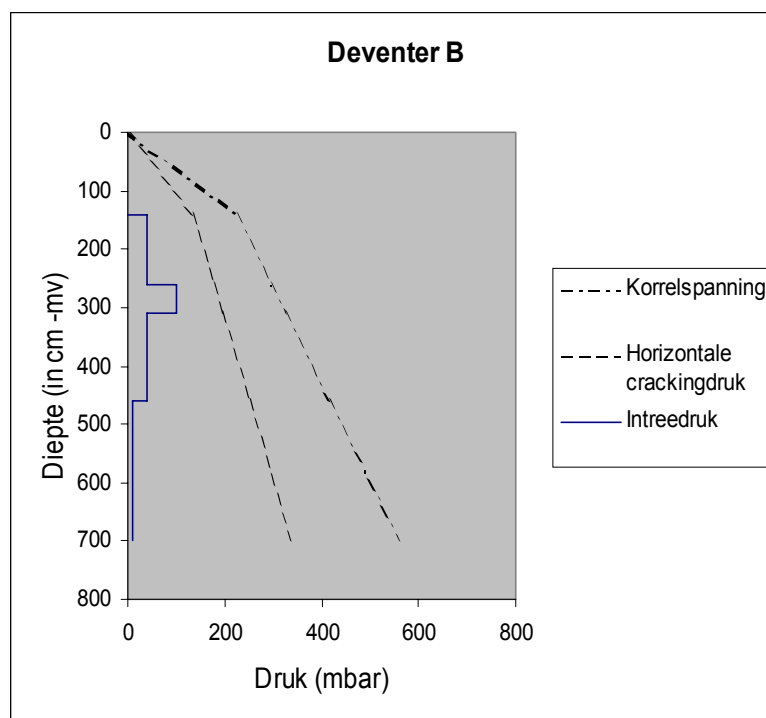


Fig. 14. Intreedruk-crackingdiagram voor locatie Deventer B.

Uit figuur 14 volgt dat de tweede laag onder de grondwaterspiegel de meest kritische laag is en dat de overdruk hier niet groter dient te zijn dan circa 200 mbar. Bij de aangenomen benodigde intreedruk van circa 100 mbar kan doorstroming van deze laag bij persluchtinjectie dus plaatsvinden. Indien de aanwezigheid van meer zandige heterogeniteiten echter minder veelvuldig is, of deze anderszins minder mede bepalend zijn voor de intreedruk van de laag, is echter ook niet

onwaarschijnlijk dat voor het doorstromen van de laag een zodanige druk nodig is dat cracking optreedt.

Bij de aanvang van de injectieproeven zijn van alle filters op locatie B de drukken bepaald waarbij voor het eerst sprake was van een meetbaar debiet. De nauwkeurigheid van de metingen hangt sterk samen met de meet- en afleesnauwkeurigheid van de debietmeter (flowmeter). Bij de uitvoering van de proeven op locatie A is de nauwkeurigheid van de meters, die in de praktijk bij persluchtinjectiesystemen worden gebruikt, onvoldoende gebleken om het begin van de luchtstroming goed te kunnen waarnemen. Tijdens de uitvoering van de proeven op locatie B is daarom een debietmeter gebruikt die nauwkeuriger kon meten in het traject van lage debieten. Op het meetstelsel en de nauwkeurigheden van de gebruikte debietmeters is ingegaan in bijlage A.

Intreedrukken zijn gemeten in de derde en vierde laag onder de grondwaterspiegel. De gemeten intreedrukken voor leemarm grof zand varieerden van 62 tot 212 mbar en voor zwak lemig fijn zand van 71 tot 118 mbar. Deze waarden zijn ruim hoger dan de P_{c5} - en P_{c10} -waarden zoals die in tabel 1 (zie 4.1) als richtwaarden voor deze grondsoorten zijn opgenomen en liggen in het bereik van de P_{c30} -waarden. Op basis van literatuur [Clayton, 1996a] werd verwacht dat al bij een geringere luchtverzadiging sprake zou zijn van een meetbaar debiet.

Voor het leemarme grove zand liggen de waarden beduidend boven de P_{c30} -waarde. Het is niet aannemelijk dat in grof zand pas bij dergelijke hoge luchtverzadigingen meetbare stroming gaat optreden. Waarschijnlijker is dat de laag niet goed door de $P_c S_w$ -curve van een 'normale' grofzandige laag wordt gekarakteriseerd, dat de gemeten intreedruk betrekking heeft op een ander systeem dan uitsluitend de grofzandige laag of dat de meetmethode onvolkomen is:

- Een andere $P_c S_w$ -curve, en daarmee een andere P_{c30} -waarde, kan van toepassing zijn in slecht gesorteerde zanden waarin kleine zandkorrels de ruimten tussen grote zandkorrels opvullen. De laag kan dan, ondanks het grofzandige karakter, toch voornamelijk zeer fijne poriën hebben. De gemeten intreedrukken behoren dan bij veel lagere luchtverzadigingen dan de $P_c S_w$ -curven voor leemarm grof zand suggereren.
- De structurele overschatting van de intreedruk in het zwak lemige zand (en dan ook in het grove zand) is mogelijk het gevolg van het betrekking hebben op een groter bodemsysteem dan de laag waarin wordt geïnjecteerd. Een meetbaar debiet zou dan gerelateerd kunnen zijn aan de minimale luchtverzadiging in een laag waarin water moeilijker wordt verdrongen. Tegen deze hypothese pleit dat de gemeten intreedrukken in direct onder elkaar gelegen filters niet goed overeenkomen. Het verschil in gemeten intreedruk tussen de diepere, grofzandige laag en de ondiepere, zwak lemige zandlaag kan niet zijn veroorzaakt door het verschil in weerstand tegen waterverplaatsing en/of door wrijvingsverliezen van de lucht langs de poriewanden tijdens het transport van de lucht. Zowel de weerstand als de wrijving zijn bij de lage injectiedebieten, zoals die tijdens de metingen zijn gebruikt, vrijwel nihil.
- De nauwkeurigheid van de meetmethode hangt samen met de nauwkeurigheid van de gebruikte debietmeter en de stapgrootte waarmee de druk op het injectiefilter wordt opgevoerd. Deze laatste bedroeg bij de uitgevoerde metingen circa 30 mbar. Het grote verschil tussen verwachte waarden en de gemeten waarden voor het grove zand, alsmede van de verschillen tussen het grove zand en het zwak lemige zand, zijn daarmee echter niet te verklaren.

De metingen op de locaties A en B geven aan dat het schatten van de intreedruk gepaard gaat met een vrij grote onzekerheid. Deze onzekerheid komt voornamelijk voort uit de relatief grote invloed die kleine verschillen in poriestructuur hebben in relatie tot de grote variatie die daarin binnen eenzelfde grondsoort aanwezig kan zijn en de moeilijkheid deze verschillen vast te stellen. Dit laatste geldt in het bijzonder voor grondsoortclassificaties die gebruik maken van sonde-

ringen waarbij uitsluitend conusweerstand en wrijvingsgetal (kleef) worden gemeten. Met name het onderscheid tussen meer en minder zandhoudende kleien en tussen meer humeuze en meer lemige zanden is vaak moeilijk. Tegenover de problemen bij het schatten staat de onnauwkeurigheid van de meting. Hierbij speelt niet zozeer de reproduceerbaarheid als wel de precisie een rol. De reproduceerbaarheid varieert in het algemeen tussen circa 70 en 90 % en is dus vrij goed. In de grofzandige laag is de reproduceerbaarheid in twee van de vijf gevallen echter beduidend kleiner en ligt dan in het bereik van slechts enkele procenten (6 - 8 %!). De precisie kan niet worden gegeven, omdat de werkelijke waarde van de intreedruk onbekend is. Ten opzichte van literatuurwaarden lijken de gemeten intreedrukken echter hoog, hetgeen kan wijzen op een structurele overschatting tot wel een factor 5 voor het zwak lemige zand. Voor de zavel lijkt de mogelijke overschatting kleiner of afwezig te zijn.

Uit de metingen wordt geconcludeerd dat de intreedruk althans lokaal - ter plaatse van het injectiepunt - sterk kan afwijken van de schatting ervan op basis van de $P_c S_w$ -curve. In het algemeen vormt dit in de praktijk geen probleem, omdat het absolute verschil van 100 - 150 mbar klein is in verhouding tot de verschillen tussen de belangrijkste lagen en ten opzichte van de druk die de meeste pompen kunnen leveren. Indien de extra druk echter cruciaal blijkt, dient de werkelijke intreedruk in het lokale bodemsysteem te worden gemeten. Het beste kan dit gebeuren door een Qh-kromme van de bodem te meten en de intreedruk daaruit af te leiden, omdat daarmee ook waardevolle informatie in de rest van het ontwerp- en dimensioneringsproces wordt verkregen (zie hoofdstuk 6).

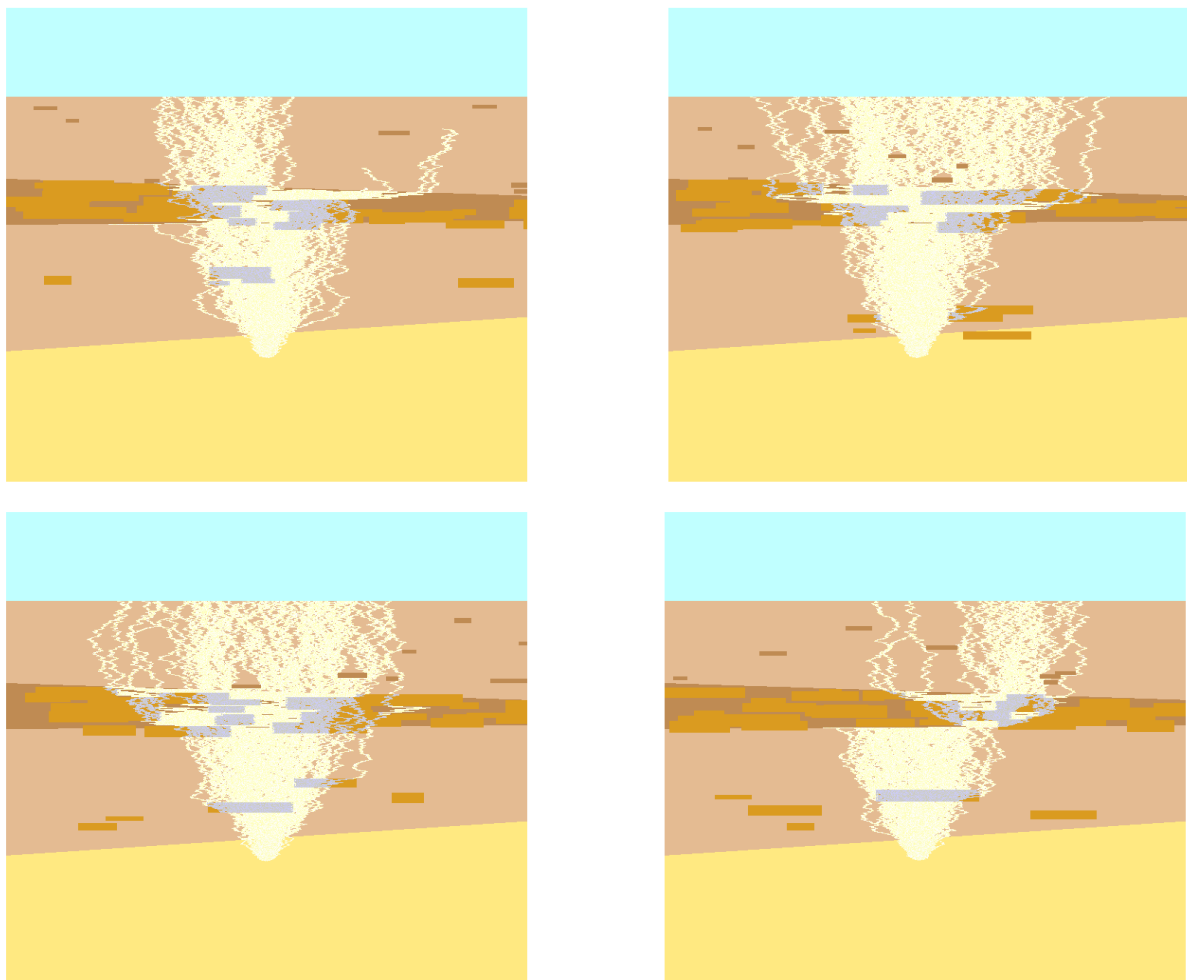


Fig. 15. Vier simulaties van het doorstromingsgedrag van perslucht op locatie Deventer B.

Ten behoeve van een inschatting van de invloed van de bodemheterogeniteit op het stromingsgedrag van de perslucht zijn ook de resultaten van de trajectdifferentiatie met betrekking tot de locatie Deventer B ingevoerd in het simulatiemodel. De uitkomsten van vier simulaties zijn weergegeven in figuur 15. Uit figuur 15 blijkt dat de laag met zandige leem een sterke gerichtheid van de luchtstroming kan veroorzaken. De mate waarin deze laag en de laag erboven wordt doorstroomd is daardoor onzeker.

Evenals voor de locatie Deventer A geldt ook voor deze locatie dat juist in deze lagen de kans op de aanwezigheid van een eventuele olieverontreiniging het grootst zou zijn.

Ook op de locatie Deventer B zijn door sonderen veertien persluchtinjectiefilters luchtdicht in de bodem ingebracht. Elk van de filters kon zowel worden gebruikt als injectiepunt als dienst doen als meetpunt van druk. Daarvoor was ieder filter voorzien van een diver. Het meetstelsel is beschreven in bijlage A. Een overzicht van de ligging, diepte en lengte van de injectiefilters is gegeven in bijlage B.

Op locatie B zijn drie persluchtproeven uitgevoerd. Een overzicht van de proeven en de injectieregimes die daarbij hebben geheerst, is vermeld in bijlage D. Ook de resultaten van de proeven op locatie B zijn verwerkt in filmpjes waarop het drukverloop in het horizontale vlak per half uur is gepresenteerd. Vier beelden daarvan voor proef 3 zijn weergegeven in figuur 16. In bijlage D is een korte beschrijving van de filmpjes opgenomen.

In de filmpjes van de proeven op locatie B worden in het algemeen iets meer en iets grotere drukveranderingen waargenomen. Alleen in proef 7 echter wordt in één filter een druk bereikt die enigszins in de orde van grootte ligt van de injectiedruk (180 mbar).

Dit, en de overige veranderingen in dit filmpje, duiden op de vorming van een luchtkussen in de zwak lemige zandlaag direct onder de zandige leemlaag. De asymmetrische en ten opzichte van het injectiepunt acentrale ligging van dit luchtkussen sluit aan bij het asymmetrische patroon zoals dat uit figuur 15 zichtbaar is in de simulatieplaatjes voor de persluchtinjectie op deze locatie. Het asymmetrische karakter van de persluchtinjectie op deze locatie blijkt ook in het filmpje van proef 3, waarvan enkele momentopnamen in figuur 16 zijn opgenomen. Hier bevindt 'het drukcentrum' zich aan een andere kant van het injectiepunt in vergelijking met de eerdergenoemde proef 7. Lucht kan op locatie B dus vrij goed worden geïnjecteerd, waarbij ook luchtkussenvorming optreedt, maar de ligging van het luchtkussen en de richting waarheen dit zich uitbreidt, is onvoorspelbaar. Het effect van persluchtinjectie op een eventuele verontreiniging zou derhalve op de locatie moeilijk te voorspellen zijn geweest.

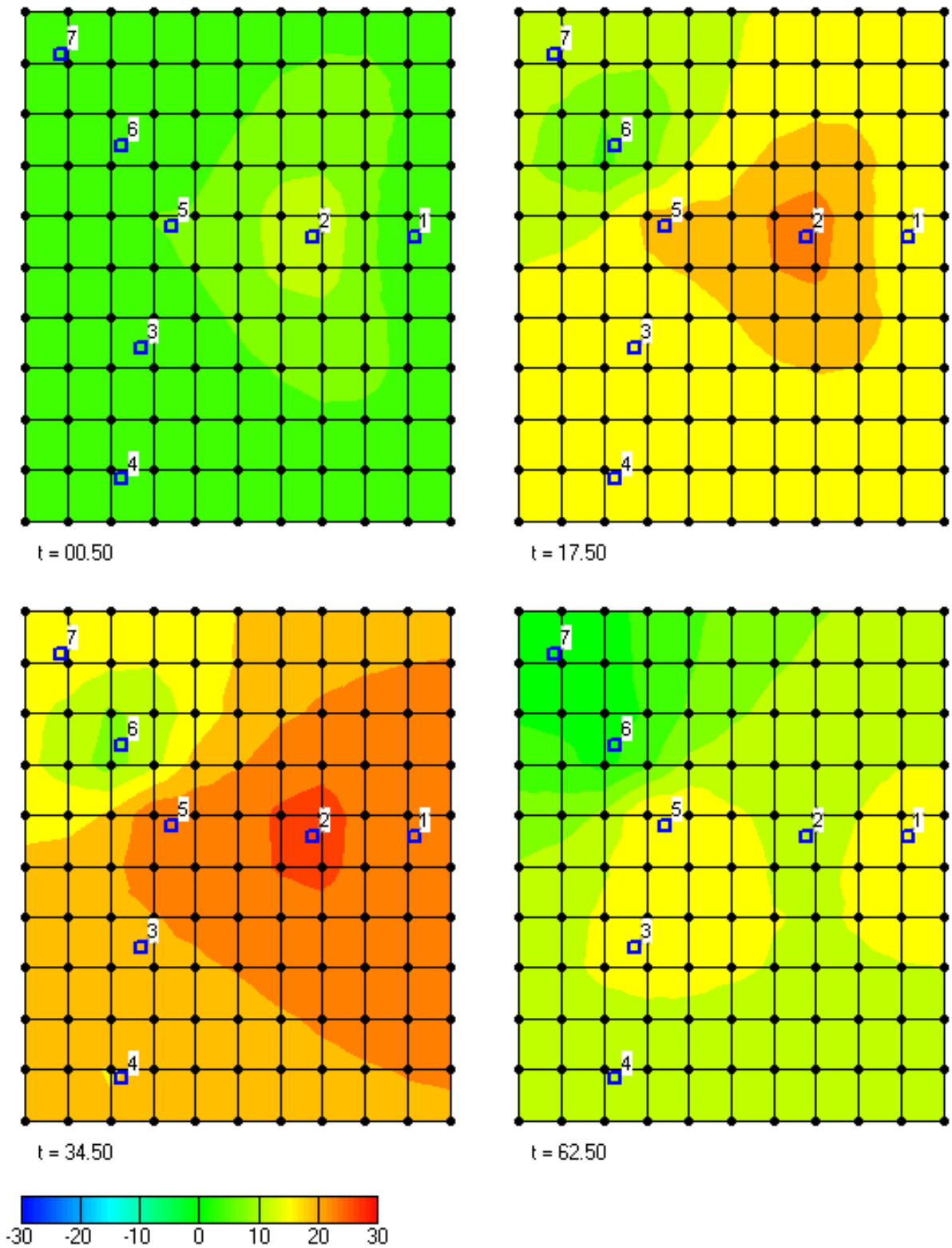


Fig. 16. Een viertal momentopnamen van het drukpatroon in het horizontale vlak tijdens de uitvoering van proef 3 op locatie B.

HOOFDSTUK 6

HANDVATTEN

In hoofdstuk 1 zijn drie primaire vragen gesteld die door een saneringsdeskundige moeten worden beantwoord om te beoordelen of persluchtinjectie op een locatie kan worden toegepast. Aan de hand van de beschouwingen in de hoofdstukken 2 t/m 5 worden in dit hoofdstuk handvatten gegeven om op deze vragen antwoorden te geven. Het beantwoordingsproces is geschematiseerd in figuur 17.

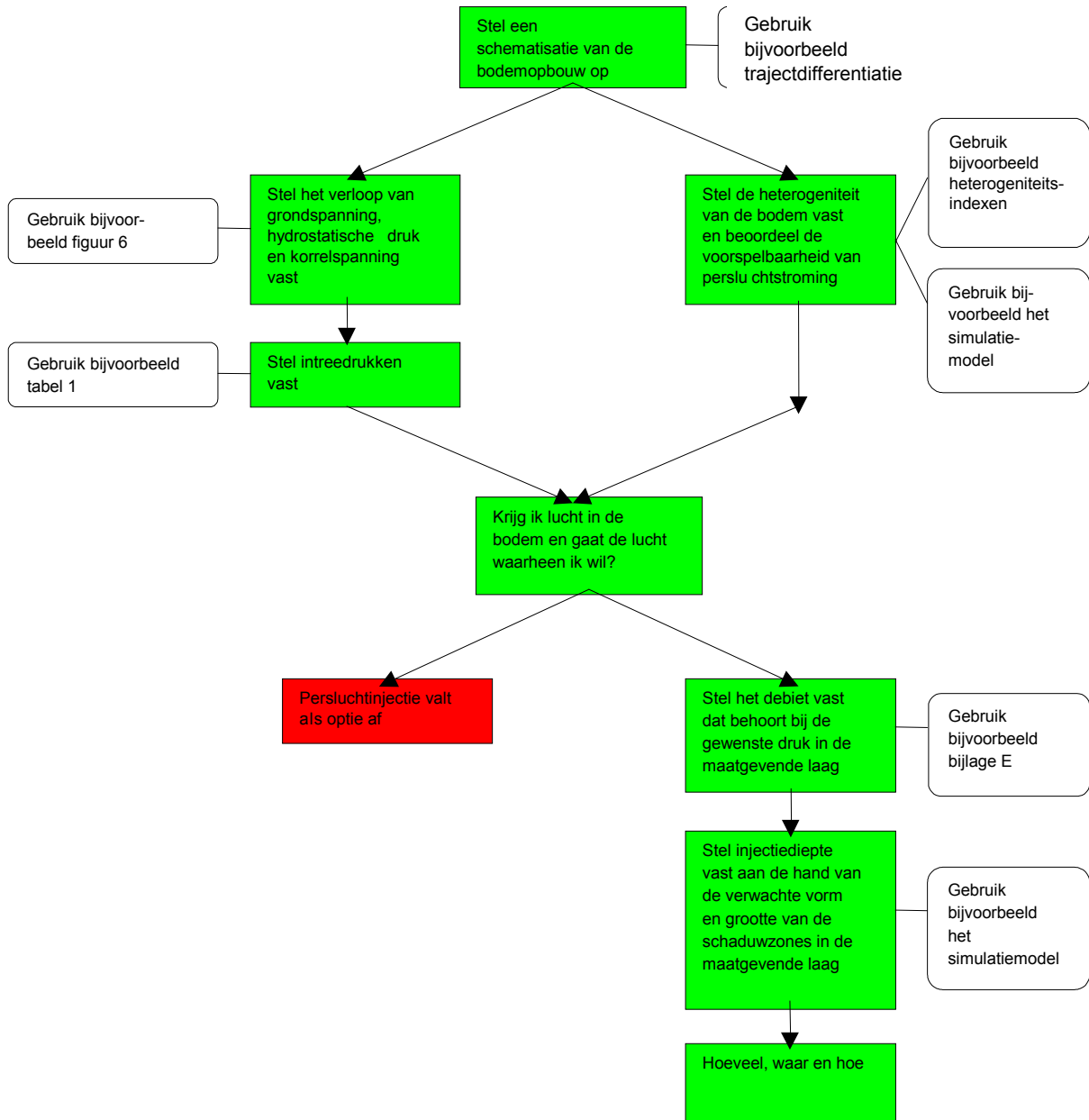


Fig. 17. Beantwoordingsproces voor de primaire vragen.

Krijg ik lucht in de bodem?

Stel een schematisatie van de bodemopbouw op. De schematisatie moet inzicht leveren in de aard van de aanwezige lagen en van de heterogeniteit daarin. Met name voor het verkrijgen van inzicht in de heterogeniteit zijn sondeergegevens zeer geschikt. Een nadeel van sondeergegevens is echter dat deze niet altijd eenduidig zijn te vertalen naar grondsoort en 'doorlatendheid voor lucht'.

Stel aan de hand van de bodemopbouw een diagram op, zoals in figuur 6, met daarin het verloop van de grondspanning, de hydrostatische druk en de minimale injectiedruk.

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.

Gaat de lucht waarheen ik wil?

Stel aan de hand van de schematisatie van de bodemopbouw ook de mate van heterogeniteit vast. Daartoe kunnen bijvoorbeeld de heterogeniteitsindexen worden gebruikt zoals die in 4.2 zijn beschreven. Indien heterogeniteitsindexen zijn vastgesteld, kan met behulp van het simulatieprogramma een grove indruk worden verkregen van het stromingsgedrag van de perslucht op de locatie. Het simulatieprogramma is beschikbaar op CD-rom.

Aan de hand van de simulatieresultaten kan de primaire vraag worden beantwoord of de mate en richting van doorstroming van de bodem voorspelbaar en daarmee beheersbaar is. Indien dit niet het geval is, is persluchtinjectie op de locatie niet toepasbaar.

Hoeveel?

Stel aan de hand van het diagram, zoals in figuur 6, de maximale overdruk vast die in de maatgevende laag kan worden ingesteld zonder dat horizontale cracking optreedt. In de meeste gevallen zal de maatgevende laag de laag zijn waarin zich de verontreiniging bevindt en waarin een bepaald persluchteffect moet worden bereikt. De betreffende maximaal realiseerbare overdruk kan worden afgelezen uit het verschil tussen de korrelspanning en de intreedruk.

Stel het debiet vast dat behoort bij de vastgestelde maximaal realiseerbare overdruk in de maatgevende laag. Gebruik hiervoor bijvoorbeeld de Qh-krommen in bijlage E. Indien dit debiet te klein is om daarvan een saneringseffect te verwachten, valt persluchtinjectie als saneringsoptie in dit stadium af. Indien het debiet wel groot genoeg is, kan worden nagegaan in hoeverre ook kan worden volstaan met een kleiner debiet.

Om het betreffende debiet in de maatgevende laag te bereiken, moet onder deze laag kunnen worden geïnjecteerd. In 4.3 is aangegeven dat de drukval ten gevolge van luchtwrijving zeer klein is nadat een luchtkanaal zich eenmaal heeft ingesteld. In de praktijk kan derhalve in iedere onderliggende laag worden geïnjecteerd met een druk die slechts weinig (enkele tientallen mbars) groter is dan de gewenste druk in de maatgevende laag. Deze druk dient dan uiteraard wel groter te zijn dan de intreedruk van de betreffende laag en van de lagen tussen de injectie-laag en de maatgevende laag. Het bij de injectiedruk behorende debiet kan worden afgelezen uit de Qh-kromme die behoort bij de grondsoort waaruit de injectie-laag bestaat.

Waar?

Naarmate de injectiediepte toeneemt, wordt in beginsel een breder gebied doorstroomd. In 4.2.1 is echter aangegeven dat de breedte van de conus in de bodem in sterkere mate afhangt van de aard en de heterogeniteit van de bodemlagen dan van de injectiediepte. Het is uiteraard wel zo

dat naarmate de injectiediepte toeneemt, de lucht meer heterogeniteiten tegenkomt en als gevolg daarvan over een groter gebied wordt verspreid.

Indien de verontreiniging zich in een laag bevindt waarin de lucht kan indringen en waarin zich weinig heterogeniteiten bevinden, kan het beste onder deze laag worden geïnjecteerd. Indien de verontreinigde laag daarentegen veel slecht doorlatende heterogeniteiten bevat, kan beter ter hoogte van de verontreiniging in deze laag worden geïnjecteerd. De heterogeniteiten zorgen dan voor de horizontale verspreiding van de lucht waardoor de plekken, waar de verontreiniging zich bevindt, met een grotere kans worden doorstroomd.

Hoe?

De druk, die nodig is om een bepaald debiet in de bodem te injecteren, is niet alleen afhankelijk van bodemtype en injectiediepte. Het persluchtinjectiesysteem - compressor, leidingen, debiet- en drukmeters en injectiefilters - hebben ook invloed op te behalen drukken en debieten. De keuze van een compressor hangt dus niet alleen samen met de te verwachten intreedruk en drukval in de bodem, maar ook met de drukval over het injectiesysteem. De drukval in het injectiesysteem is afhankelijk van het debiet, net zoals in de bodem.

Het injectiesysteem moet daarom ontworpen worden op basis van de te verwachten injectiedrukken en debieten. In een goed gedimensioneerd systeem is de drukval in de leidingen verwaarloosbaar ten opzichte van de benodigde druk. Bij een eerste ontwerp van het injectiesysteem kan gebruik worden gemaakt van enkele vuistregels om leidingen en filters te dimensioneren. Deze vuistregels zijn gecombineerd en weergegeven in figuur 18.

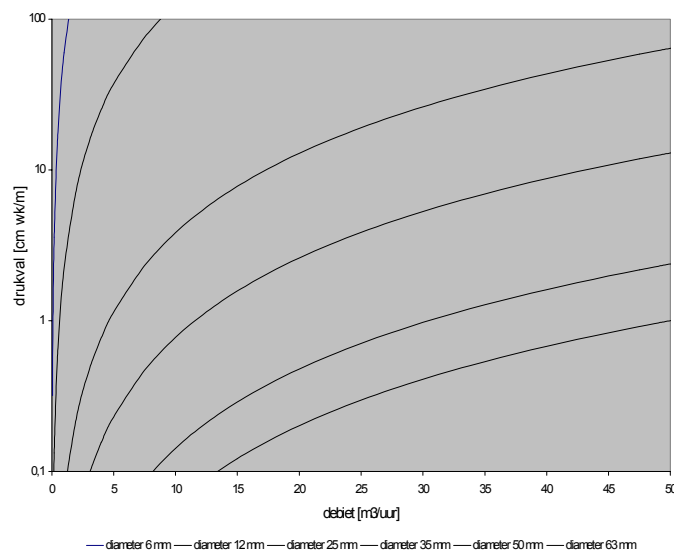


Fig. 18. Drukval per meter leidingsysteem.

In figuur 18 is de drukval per meter leiding weergegeven voor enkele leidingdiameters en verschillende debieten. Uitgegaan is van een injectiedruk van 1,5 bar oftewel van 0,5 bar overdruk. Om een idee te geven hoe bovenstaande figuur kan worden gebruikt, wordt hier een voorbeeld besproken.

Stel er wordt 2,5 meter onder de grondwaterspiegel perslucht geïnjecteerd in een zandige laag. Uit het ontwerp blijkt dat het gewenst is om 5 m³/uur te injecteren. Uit de Qh-kromme van de bodem blijkt dat er een druk van ongeveer 75 mbar nodig is om dit debiet te kunnen injecteren. In totaal is er dan een overdruk van 325 (= 250 + 75) mbar nodig.

De vraag is nu welke maatvoering het beste kan worden gebruikt voor het injectiefilter en de leiding naar het injectiefilter. Indien goed gedimensioneerd, moet de drukval in de leidingen verwaarloosbaar zijn ten opzichte van de injectiedruk. In dit geval betekent dat een drukval over het leidingsysteem in de orde van grootte van enkele cm wk. Stel er is in totaal 20 meter leidingwerk en de drukval mag maximaal 50 cm wk zijn over het systeem. Dit betekent een drukval van 2,5 mbar per meter leiding. Uit figuur 18 volgt vervolgens dat een debiet van 5 m³/uur en een drukval van maximaal 2,5 mbar per meter leiding haalbaar is met een leiding- en filterbinnendiameter van 25 mm. Stel er zou gekozen worden voor een leidingdiameter van 12 mm dan betekent dit dat alleen al in het leidingwerk een drukval van ongeveer $20 \cdot 50 = 1000$ mbar te verwachten is.

LITERATUUR

Baker, R.S. en D. McKay, 1996.

Evaluation of air-entry pressure during in situ air sparging: a potentially rapid method of feasibility assessment.

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

Clayton, W.S., 1996a.

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.

Clayton, W.S., 1996b.

The effects of fingered flow on relative permeabilities during air sparging.

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

Lenormand, R., E. Touboul en C. Zarcone, 1988.

Numerical models and experiments on immiscible displacements in porous media.

J. Fluid Mech., 18(9), pp. 165-187.

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

Bodemkunde van Nederland. Deel 1: Algemene Bodemkunde.

Stichting Bodemkartering, Malmberg, Den Bosch.

Lundegard, P.D. en G. Andersen, 1996.

Multiphase numerical simulation of air sparging performance.

Ground Water, 34(3), pp. 113-115.

Marley, M.C., J.D. Polonsky en C.C. Lizotte, 1996.

Expanding sparging technology through oxygen injection.

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

Smith, S.J., J. Pepe en G.R. Walter, 1996.

The effect of variable injection rates on air sparging patterns in heterogeneous porous media.

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

Wehrle, K., 1990.

In situ cleaning of CHC contaminated sites: Model-scale experiments using air injection (in situ stripping) method in granular soils.

In: Arenak, F., M. Hinsenveld en W.J. van den Brink (eds.), Contaminated Soils '90, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, pp. 1061-1062.

White, N.F., D.K. Sunada, H.R. Duke en A.T. Corey, 1972.

Boundary effects in desaturation of porous media.

Soil Sci., 113(1), pp. 7-12

BIJLAGE A

PERSLUCHTINJECTIESYSTEEM

A1 Het systeem

Het persluchtinjectiesysteem zoals dat gebruikt is tijdens de proeven wordt in deze bijlage beschreven. Het systeem bestond uit de volgende onderdelen (al deze onderdelen waren ingebouwd in een container van de firma Logisticon):

- Compressor (merk Rietschle; type DTA 100 (01); maximaal debiet: 97 m³/h; maximale opvoerdruk: 1,5 bar; vermogen: 5,5 kW; maximaal toerental: 1.450 toeren/min).
- Ventilator voor afvoer van de door de compressor geproduceerde warmte (merk Bauknecht; type R 0,09/2-71 no. 1; maximaal toerental: 2.750 toeren/min).
- Frequentieregelaar (merk Telemecanique; type altivar 18).
- Luchtverdeelunit (manifold) waarop de persluchtstroom afkomstig van de compressor kon worden aangesloten. Hiermee kon de totale persluchtstroom van de compressor over maximaal vijf aparte persluchtstromen worden verdeeld.
- Vier manometers; één manometer was op het manifold gemonteerd ten behoeve van het meten van de luchtdruk van de totale persluchtstroom vóór het manifold. Daarnaast waren drie manometers gemonteerd op de afvoerbuizen van het manifold ten behoeve van het meten van de luchtdruk in de afgetakte persluchtstromen.
- Debietmeter.
- (Flowbuis)persluchtslangen.
- Koppelstukkensondeerstangen met injectiefilters.

Het persluchtinjectiesysteem is schematisch weergegeven in figuur A1.

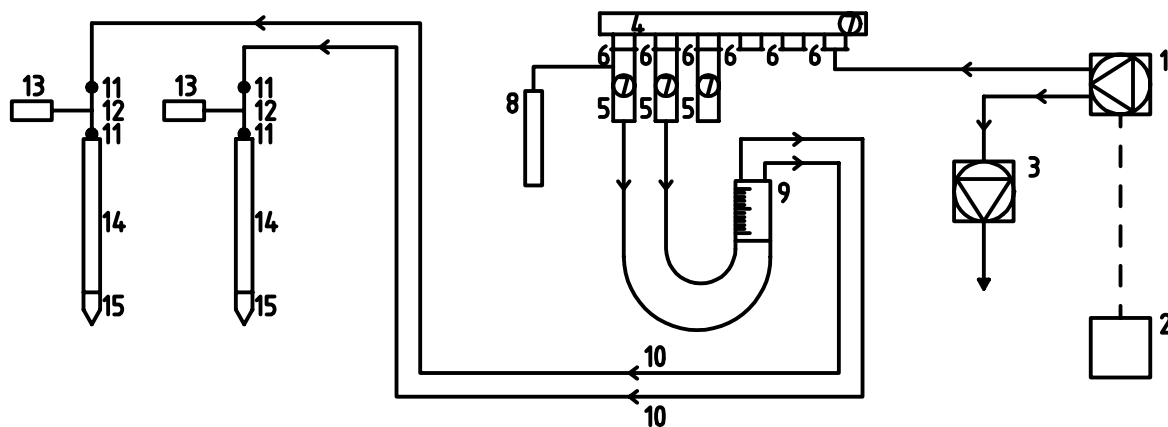


Fig. A1. Persluchtinjectiesysteem tijdens de injectieproeven.

Het debiet dat de compressor levert, zie figuur A1, onder (1)¹, kan tot een bepaalde waarde van traploos worden opgevoerd door middel van het instellen van het toerental van de compressor. Het toerental kon met behulp van de frequentieregelaar, zie (2), trapsgewijs worden ingesteld. Door de compressie van de lucht wordt deze opgewarmd. Om te voorkomen dat het leidingsysteem te warm wordt en daardoor vervormd, wordt de warmte door een ventilator, zie (3), afge-

¹ De tussen haakjes geplaatste nummers in deze paragraaf verwijzen naar de corresponderende nummers in figuur A1.

zogen. De perslucht, afkomstig van de compressor, was aangesloten op een verdeelunit (manifold), zie (4). Dit manifold bezat 3 afvoerbuizen, zie (5).

Het aantal injectiepunten, waarmee tijdens de proeven werd geïnjecteerd, was bepalend voor het aantal afsluiters, gemonteerd op het manifold, zie (6), dat open dan wel dicht werd gezet.

De drukken vóór het manifold en na de afsluiters van de afvoerbuizen werden gemeten met manometers, zie (7).

Het meetbereik van deze manometers bedroeg 0 tot 4 bar overdruk met een afleesnauwkeurigheid van circa 0,05 bar. Op de afvoerbuizen waren aparte luchtafvoerkraantjes gemonteerd (niet in fig. A1 aangegeven). Op het bemonsteringskraantje van een met een lucht doorstroomde afvoerbuis was tijdens de proeven een aparte drukmeter aangesloten. Deze drukmeter betrof een 'diver' (zie A3). De diver was in een luchtdichte koker geplaatst. Deze koker, zie (8), was op zijn beurt met een persluchtslangetje verbonden met het bemonsteringskraantje. De drukmeting met de diver was nauwkeuriger dan die met eerder genoemde manometers en daarnaast kon de druk hiermee continu worden geregistreerd.

Tijdens de injectieproeven waren op het uiteinde van twee afvoerbuizen één duims luchtslangen (binnendiameter circa 33 mm) vastgekoppeld. Deze slangen waren in een U-vorm gebogen, zodat hierop vervolgens een rechtopstaande flowbuis kon worden gemonteerd, zie (9). In totaal zijn tijdens de persluchtinjectieproeven drie soorten flowbuizen toegepast. Een nadere beschrijving van de gebruikte soorten flowbuizen wordt beschreven in A2. In het traject na de flowbuis was vervolgens een vernauwing met een binnendiameter van circa 10 mm aangebracht. Op deze vernauwing kon een persluchtslang met een binnendiameter van 12 mm worden aangesloten.

De gebruikte persluchtslangen hadden een lengte van circa 30 m en konden alle aanwezige persluchtinjectiepunten voorzien van perslucht, zie (10). Een persluchtslang werd op de persluchtinjectiepunten aangesloten door middel van snelsluitkoppelingen, zie (11). De binnendiameter van deze snelsluitkoppelingen bedroeg 6 mm. Deze snelsluitkoppelingen waren onderdeel van de T-stukjes, zie (12), die waren ontworpen voor het tegelijkertijd kunnen inbrengen van de perslucht en het meten van de luchtdruk ter plekke van het persluchtinjectiepunt. De druk werd gemeten met een diver, zie (13). De T-stukjes zijn te beschouwen als onderdeel van het drukmeetsysteem en zullen nader worden beschreven in A3. De persluchtinjectiepunten betroffen holle sondeerstangen, zie (14), die met behulp van een sondeerwagen een aantal meter de bodem in waren gedrukt. De binnendiameter van deze sondeerstangen bedroeg circa 6 mm en de lengte ervan varieerde van circa 2,5 m tot 5 m.

Elke sondeerstang was aan de onderkant voorzien van een injectiefilter, zie (15). Het injectiefilter was uitgevoerd als een holle cilinder met een lengte van circa 25 cm. De binnendiameter bedroeg circa 30 mm. Het filter was vervaardigd van roestvrijstaal en bezat deze horizontale sleufjes ten behoeve van de luchtdoorvoer. De onderkant van het filter bestond uit een massieve metalen conus (lengte van de conus ongeveer 5 cm). Aan de bovenkant van de sondeerstangen waren 'opzetstukjes' met snelsluitkoppelingen voor de aansluiting van de T-stukjes geschroefd, (zie A3).

Tijdens de injectieproeven is op één of op twee punten tegelijkertijd geïnjecteerd. Tijdens de injectie op twee punten was een extra voorziening getroffen om de twee persluchtstromen beurtelings door de flowmeter te leiden. Hiermee was het mogelijk om het injectiedebiet van beide persluchtstromen te kunnen bepalen. Dit zal in de volgende paragraaf nader worden beschreven.

A2 Flowmeetsysteem

Tijdens de persluchtinjectieproeven was in eerste instantie een flowbuis van het merk Heinrichs ingezet. Deze flowbuis betrof een holle doorzichtige buis waarin een conus als 'flowindicator' door zijn luchtweerstand verticaal omhoog werd gestuwd door de perslucht. De mate waarin deze conus omhoog werd gestuwd, was maatgevend voor het persluchtdebiet. Het meetbereik van deze flowbuis lag tussen 150 l/uur en 1.600 l/uur. De afleesfout bedroeg circa 25 l/uur.

Bij de eerste proeven bleek de geïnjecteerde flow beneden de ondergrens van de schaalverdeling van de flowbuis (150 l/uur) te liggen. Daarom is vervolgens een 'flowmeter', type GT 1350-serie Sho rate (merk Brooks Instrument), ingezet. Dit betrof tevens een flowbuis, maar met in dit geval een RVS-kogeltje als flowindicator. Het meetbereik van deze flowmeter liep van circa 44 l/uur tot 440 l/uur. De meetfout was gespecificeerd op circa 5 % FS (full-scale). In praktijk bleek de meetfout groter te zijn, doordat het RVS-kogeltje ten gevolge van luchtdrukvariatie in het persluchtinjectiesysteem nogal vibreerde. Door deze vibratie was de meetfout naar schatting 10 %. Bij de laatste injectieproeven werd de hierboven beschreven flowmeter vervangen door een flowmeter, type 5850 SMART MASS FLOW CONTROLLER (merk Brooks Instrument), met mogelijkheid tot continue registratie van het persluchtdebiet.

Het meetbereik van deze flowmeter lag tussen 20 l/uur en 1.000 l/uur. De meetnauwkeurigheid was gespecificeerd op circa 0,2 % FS. De in het bij deze meter behorende elektronische geheugen opgeslagen debietgegevens konden na afloop van de proeven worden uitgelezen in een computerbestand en verder worden verwerkt. Dit uitlezen werd uitgevoerd met behulp van het programma 'DDE' (Digital Data Exchange) dat de communicatie tussen de MASS FLOWMETER en het dataverwerkingsprogramma (EXCEL) tot stand bracht. Het 'DDE'-programma kon vanuit EXCEL worden geïnstrueerd, zoals bijvoorbeeld de tijdsfrequentie van uitlezen van de debietgegevens. De tijdens de meeste injectieproeven gebruikte uitleesfrequentie bedroeg eenmaal per 30 seconde.

Opgemerkt moet worden dat de met de flowbuizen afgelezen debieten ten behoeve van de inschatting van de werkelijk geïnjecteerde luchtdebieten eerst moesten worden teruggerekend naar debieten behorende bij de heersende druk en temperatuur in de bodem (met behulp van de Wet van Boyle).

Gedurende een aantal persluchtinjectieproeven zijn twee injectiepunten simultaan gebruikt. Hiertoe werden twee aparte luchtstromen met behulp van het manifold afgetakt. Deze twee luchtstromen konden met behulp van het in de figuur A2 weergegeven 'bypass-netwerk' om beurten op de flowmeter worden aangesloten. Door het omzetten van een aantal afsluiters in dit bypass-netwerk kon beurtelings één van beide luchtstromen door de flowmeter worden geleid en het bijbehorende injectiedebiet worden afgelezen, zonder dat hierbij de persluchtinjectie van beide persluchtstromen werd onderbroken.

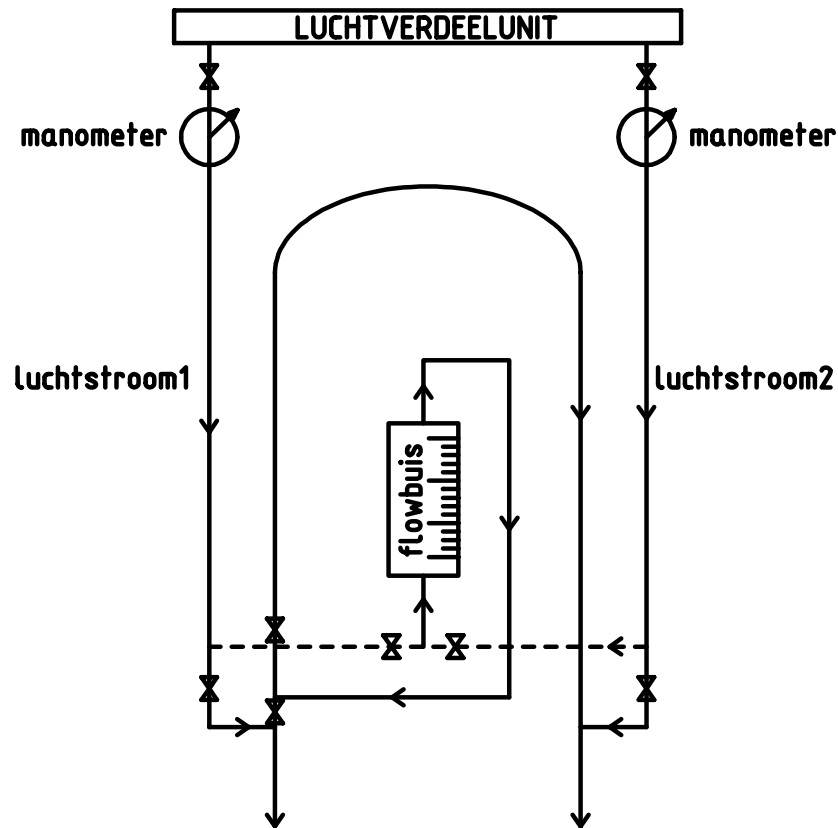


Fig. A2. Flowmeetsysteem.

A3 Drukmeetsysteem

Het drukmeetsysteem voor monitoring van het drukverloop in de bodem tijdens de perslucht-injectieproeven bestond feitelijk uit een netwerk van 14 divers. Deze divers waren bevestigd op even zoveel sondeerstangen door middel van T-stukjes. De verschillende onderdelen van het drukmeetsysteem zijn in figuur A3 weergegeven.

De diver, zie figuur A3², was in een stukje gewapend perslucht slang geschoven, zie (2), en met behulp van een 'aanschroefbeugel' vastgeklemd, zie (3). De binnendiameter van de stukjes perslucht slang bedroeg 3 cm en de gemiddelde lengte was circa 15 cm. Om lekverlies van lucht tegen te gaan was een laagje vaseline aangebracht aan de binnenkant van de perslucht slang en wel tussen de perslucht slang en de diver. De druksensor van de diver bevond zich aan de onderkant van de diver, zie (4). Het stukje perslucht slang was weer met een 'aanschroefbeugel', zie (5), vastgeklemd op één van de drie uiteinden van het T-stukje, zie (6). Een ander uiteinde van het T-stukje was voorzien van een snelsluitkoppeling waarop de perslucht, zie (7), kon worden aangesloten, zie (8). Het derde uiteinde van het T-stukje was voorzien van een metalen pijpje dat kon worden vast geklikt op de snelsluitkoppeling van het opzetstukje op de bovenkant van de sondeerstang, zie (9). Elke sondeerstang kon door het gebruik van de T-stukjes als monitoringspunt (meting van de druk in de sondeerstang met behulp van de diver) worden gebruikt of gelijktijdig als monitoringspunt en injectiepunt, indien hierop perslucht was aangesloten. Alle 14 divers waren met kabels van circa 15 m, zie (10), verbonden met twee schakelkastjes.

² De tussen haakjes geplaatste nummers in deze paragraaf verwijzen naar de corresponderende nummers in figuur A3.

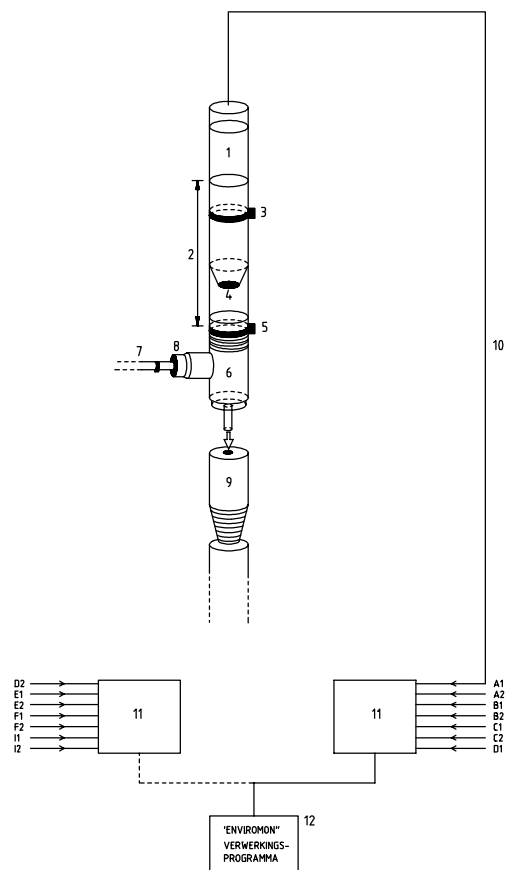


Fig. A3. Onderdelen van het drukmeetsysteem.

Zowel de divers als de kabels waren op dezelfde wijze gecodeerd als de injectiefilters (met codes A1, A2,.....I1, I2 tijdens de injectieproeven op proeflocatie A, respectievelijk met codes K1, K2,.... Q1, Q2 tijdens de proeven op proeflocatie B).

De schakelkastjes, zie (11), konden beurtelings in verbinding worden gebracht met een computer, waarop het programma 'Enviromon' was geïnstalleerd, zie (12). Met de schakelaars op de kastjes kon om de beurt een diver worden geselecteerd waarvan de meetgegevens door het programma moesten worden ingelezen. Met dit programma 'Enviromon' konden de meetgegevens vervolgens worden verwerkt of on-line op het scherm van de computer worden weergegeven. De meetgegevens betroffen niet alleen geregistreeerde drukken, maar ook door de divers gemeten temperaturen.

Tien van de veertien divers konden alleen druk meten. Het betrof zogenaamde D-divers van het type D1212 (Van Essen Instruments). Het meetbereik van dit type diver lag tussen 0 en 400 cm waterkolom. De meetnauwkeurigheid bedroeg hierbij 0,2 % FS (gemeten bij 10 °C). Het interne geheugen van dit type diver kon maximaal 16.000 metingen opslaan. Na het vol raken van dit geheugen, of desgewenst eerder, kon met het programma 'Enviromon' het geheugen worden gewist. Vervolgens kon de desbetreffende diver weer met een 'schone lei' worden ingezet.

Behalve tien D-divers werden ook vier TD-divers, type D1214, gebruikt die de mogelijkheid bezaten om naast druk ook temperatuur te meten. Het meetbereik van deze divers voor druk bedroeg 0 tot 900 cm wk. Voor temperatuur liep het meetbereik van -20 °C tot 80 °C. De meet-

nauwkeurigheid van deze divers voor druk bedroeg eveneens 0,2 % FS. Voor temperatuur bedroeg de meetnauwkeurigheid 0,1 °C. Het interne geheugen van dit type diver kon voor beide te meten parameters maximaal 24.000 metingen opslaan.

De frequentie waarmee de meetgegevens konden worden opgeslagen kon bij alle divers met het programma 'Enviromon' worden ingesteld tussen 0,5 seconde en 99 uur. Tijdens de persluchtinjectieproeven werd een vijftiende (TD-)diver ingezet om luchtdrukvariaties tijdens de persluchtinjectieproeven te meten, zodat na de proeven de gemeten drukken hiervoor gecorrigeerd konden worden.

Een zestiende (D-)diver werd ingezet voor het meten van de persluchtdruk in het persluchtinjectiesysteem. Voor een aantal persluchtinjectieproeven bleek het meetbereik van de aanwezige divers bij meting op het persluchtinjectiepunt te klein te zijn. Dit werd ondervangen door een extra (TD-)diver aan te schaffen met een meetbereik voor druk tot 2.900 cm wk. De meetnauwkeurigheid van deze diver hierbij bedroeg 0,2 % FS.

A4 Drukvalproef met het persluchtinjectiesysteem

Alvorens de persluchtinjectieproeven werden opgestart, werd eerst een drukvalproef uitgevoerd met het persluchtinjectiesysteem. Deze proef werd uitgevoerd om zoveel mogelijk inzicht te krijgen in de werkelijke injectiedruk ter plaatse van het injectiefilter in de bodem. De drukvalproef werd uitgevoerd bij verschillende injectiedebieten. Op de volgende punten in het persluchtinjectiesysteem, zie ook figuur A4³, werd de persluchtdruk bij verschillende injectiedebieten gemeten:

- in de met lucht doorstroomde afvoerbuis van het manifold (zie (2) in fig. A4) met behulp van een manometer;
- de aansluiting van de perslucht boven op de sondeerstang met een diver (zie (4) in fig. A4);
- de onderkant van de sondeerstang (vlak vóór het passeren van de perslucht door het injectiefilter) met een diver (zie (6) in fig. A4).

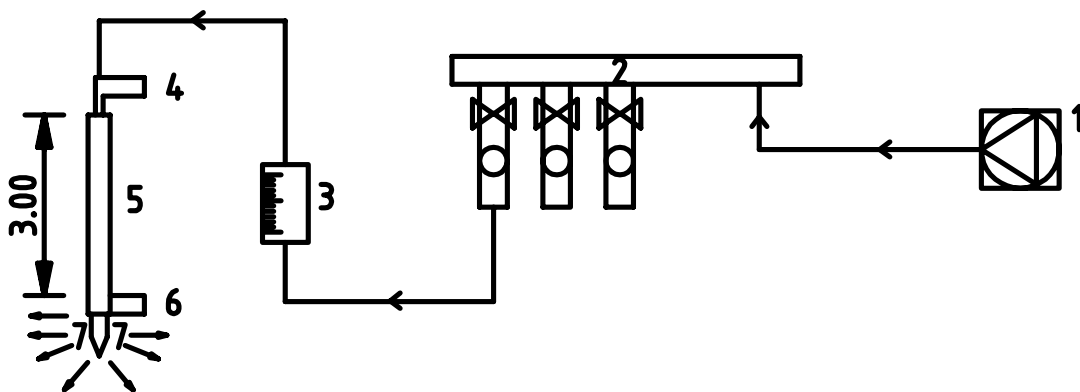


Fig. A4. Proefopstelling voor het meten van de drukval.

De toevoer van de perslucht van de compressor, zie (1), werd via het manifold, zie (2), in zijn geheel langs de flowmeter, zie (3), geleid en vervolgens naar een sondeerstang, zie (5). De lengten van de tijdens de drukvalproef gebruikte persluchtslangen en sondeerstang werden zo gekozen dat deze zoveel mogelijk overeenkwamen met de lengten die later tijdens de perslucht-

³ De tussen haakjes geplaatste nummers in deze paragraaf verwijzen naar de corresponderende nummers in figuur A4.

injectieproeven werden gebruikt. De lengte van de sondeerstang bedroeg 3 m. Zowel boven- als benedenstrooms van de sondeerstang werd met twee divers, zie (4) en (6), de luchtdruk gemeten. De perslucht kon aan het einde van haar weg door de meetopstelling langs het injectiefilter vrij naar atmosferische druk wegstromen, zie (7).

Voor de punten (4) en (6) in het persluchtinjectiesysteem werden vervolgens Qh-krommen (debiet-druk-krommen) opgesteld. Een voorbeeld van deze Qh-krommen is weergegeven in figuur A5. In deze figuur is de druk weergegeven (y-as), gemeten met de diver bij punt (4), in het persluchtsysteem als functie van het injectiedebiet (x-as) bij twee verschillende instellingen van de motorfrequentie van de compressor (30 Hz, respectievelijk 25 Hz). In figuur A5 is te zien dat bij toename van het injectiedebiet de druk op dit punt van het persluchtinjectiesysteem ook toeneemt. Tevens is de druk aan de onderkant van de sondeerstang met een diver gemeten, zie (6) in figuur A4. Deze druk bedroeg nauwelijks meer dan atmosferische druk en nam nauwelijks toe bij verhoging van het injectiedebiet.

De bedoeling was om met behulp van de kennis van de drukval over het systeem en de tijdens de persluchtinjectieproeven gemeten drukken met de divers, die waren aangesloten boven op de sondeerstangen, de werkelijke injectiedrukken (althans de heersende drukken vlak vóór het passeren van de perslucht langs de injectiefilters) bij verschillende injectiedebieten te kunnen berekenen. In figuur A5 is echter ook te zien dat de gemeten drukval pas vanaf een injectiedebiet van 150 l/uur is geregistreerd. Dit omdat de ondergrens van het meetbereik van de gebruikte debietmeter circa 150 l/uur bedroeg. De meetpunten zijn gefit met behulp van de methode der kleinste kwadraten.

Tijdens de injectieproeven kwamen de gemeten injectiedebieten in veel gevallen lager uit dan 150 l/uur, zodat de waarde van de drukval over de sondeerstang in deze gevallen slechts grof kon worden geschat door een kromme door de meetpunten in figuur A5 te extrapoleren naar het nulpunt en vervolgens bij het desbetreffende injectiedebiet via deze kromme de drukval af te leiden. Uit deze extrapolatie volgt dat de drukval van het systeem tot een debiet van ongeveer 100 l/uur relatief klein is ten op zichten van de injectiedruk.

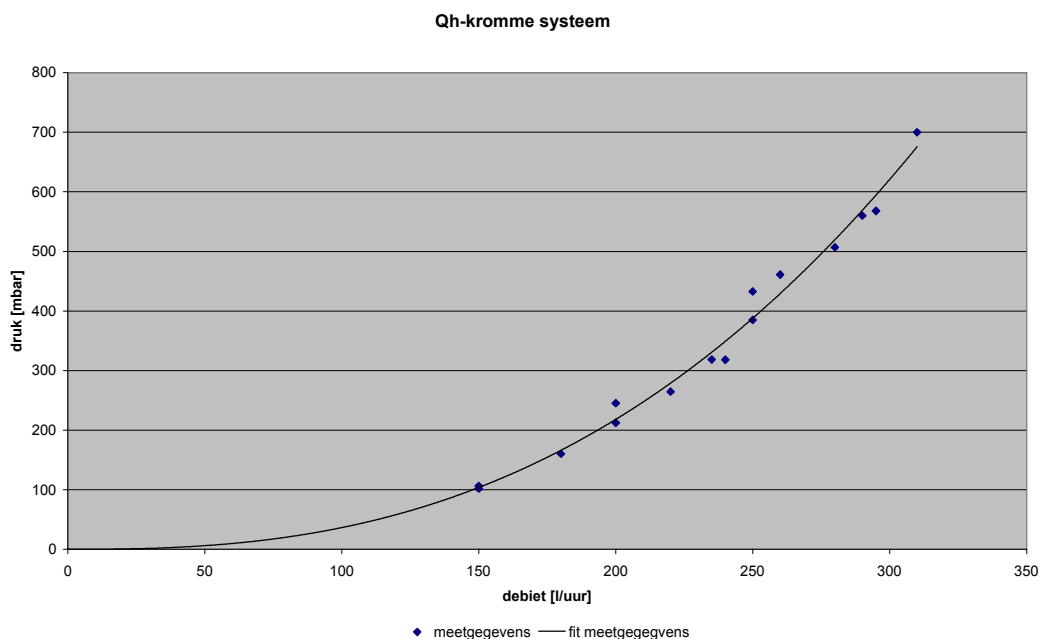


Fig. A5. Qh-kromme systeem.

Tijdens de injectieproeven was het injectiedebiet steeds laag (meestal rond de 100 l/uur en maximaal circa 600 l/uur). Uit figuur A5 is vervolgens af te leiden dat de drukval over de sondeerstangen tijdens de injectieproeven gering is geweest.

A5 Meting van lekverlies bij het persluchtinjectiesysteem

Gebleken is dat tijdens een aantal persluchtinjectieproeven lekverlies optrad langs de naden tussen de bovenkant van de desbetreffende sondeerstang waarop de perslucht was aangesloten en de opgeschroefde opzetstukjes. Dit lekverlies kon worden geminimaliseerd door gebruik van afplaktape en het stevig aandraaien van de opzetstukjes met behulp van een sokkentang. Tevens trad lekverlies van lucht op bij de persluchtinjectiepunten langs de bevestigingen van de stukjes perslucht slang aan de uiteinden van de T-stukjes. Enig lekverlies bleek tijdens de desbetreffende injectieproeven echter moeilijk te voorkomen. Voor een juiste interpretatie van de gemeten flow moest worden gecorrigeerd voor dit lekverlies. Hiertoe werd in week 41 een flowdiagram van het lekverlies opgesteld als functie van de druk in het persluchtinjectiesysteem.

Het flowdiagram werd opgesteld door stapsgewijs druk op te voeren in het persluchtinjectiesysteem dat hierbij aan het uiteinde (bij een T-stukje) luchtdicht werd afgesloten. De gemeten flow werd ook stapsgewijs bijgehouden. Uit een dergelijk flowdiagram kon bij een gegeven druk worden afgelezen hoe groot het corresponderende lekverlies was geweest en dus hoeveel de tijdens de persluchtinjectieproeven gemeten flow naar beneden moest worden gecorrigeerd. De nulwaarde van de gemeten flow in dit diagram correspondeert met circa 44 l/uur. De maximale waarde van de gemeten flow (op de y-as) in dit diagram correspondeert met circa 120 l/uur.

In het flowdiagram werd tevens een foutenmarge ($\pm 10\%$ van het gemeten lekverlies) aangegeven van de gemeten lekverliezen. Ook tijdens de persluchtinjectieproeven werden foutenbanden van de gemeten flowwaarden bepaald. Zodra tijdens de persluchtinjectieproeven, bij een meting van de flow, de waarde aan de onderkant van het foutengebied behorende bij deze meting boven het foutengebied van de corresponderende lekverlieswaarde lag, kon worden gesproken van werkelijke persluchtinjectie.

BIJLAGE B

LIGGING, DIEPTEN EN LENGTEN VAN DE INJECTIEFILTERS

Tabel B1. Positie van de filters op locatie A.

filter	z (diepte)	x	y
A1	2,40 - 2,60	19,42	24,75
A2	3,00 - 3,20	19,38	25,33
B1	2,10 - 2,30	16,65	25,33
B2	3,00 - 3,20	16,47	25,61
C1	2,10 - 2,30	14,52	23,3
C2	3,00 - 3,20	14,42	22,55
D1	2,10 - 2,30	15,38	20,37
D2	3,00 - 3,20	15,52	19,65
E1	2,10 - 2,30	18,69	19,68
E2	3,00 - 3,20	18,89	19,3
F1	2,10 - 2,60	21,02	22
F2	3,00 - 3,20	21,02	22,73
I1	3,00 - 3,20	17,52	22,15
I2	4,00 - 4,20	17,52	21,85

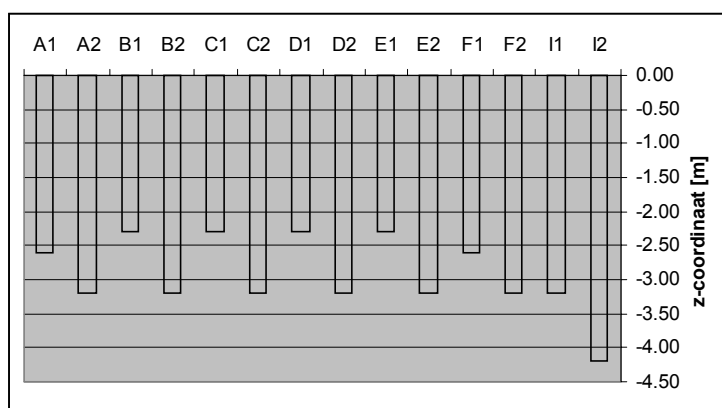
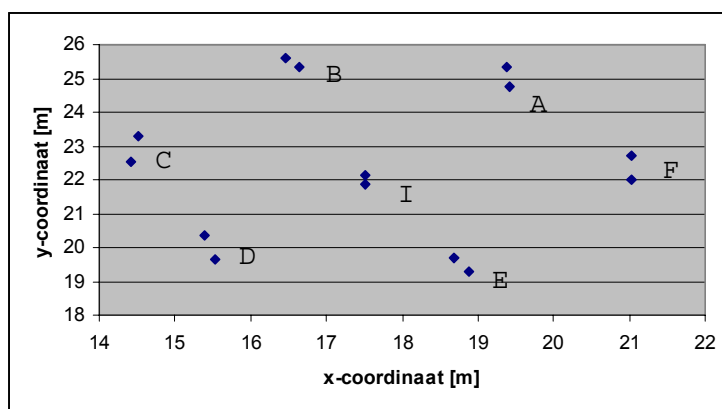


Fig. B1. Positie van de filters op locatie A.

Tabel B2. Positie van de filters op locatie B.

filter	z (diepte)	x	y
K1	5,19 - 5,39	17,25	35,90
K2	3,34 - 3,54	17,25	36,00
L1	5,19 - 5,39	16,70	36,10
L2	3,30 - 3,50	16,75	36,00
M1	4,87 - 5,07	16,10	35,45
M2	3,21 - 3,41	15,90	35,45
N1	4,80 - 5,00	16,00	34,90
N2	3,27 - 3,47	15,80	34,80
O1	5,29 - 5,49	16,25	36,10
O2	3,16 - 3,36	16,05	36,05
P1	5,40 - 5,60	16,00	36,50
P2	3,31 - 3,51	15,80	36,45
Q1	5,38 - 5,58	15,80	37,00
Q2	3,16 - 3,36	15,50	36,90

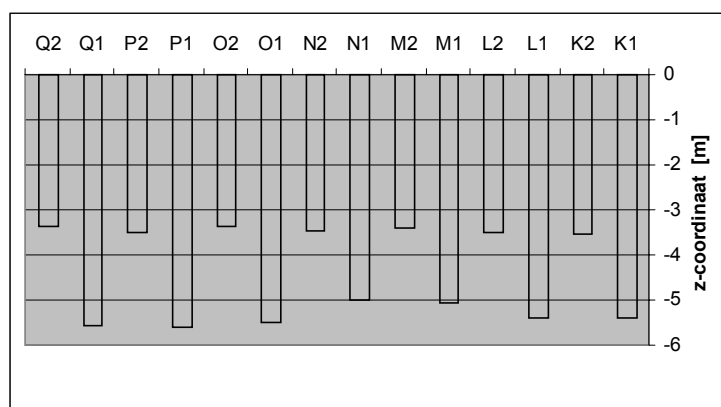
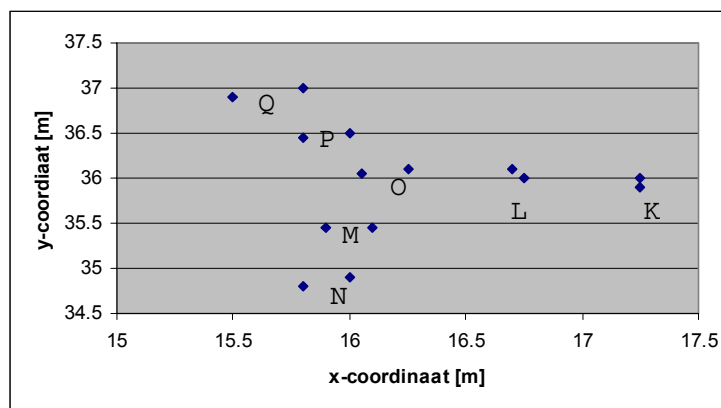


Fig. B2. Positie van de filters op locatie B.

BIJLAGE C

GEMETEN INTREEDRUKKEN

Tabel C1. Gemeten intreედrukken.

filter	grondsoort	intreedruk (mbar)		reproduceerbaarheid (%)
		meting 1	meting 2	
A2	zware zavel	271		
B2	zware zavel	304		
D1	zware zavel	363		
E2	zware zavel	355		
F2	zware zavel	338		
I2	zware zavel	488		
K1	grof zand	62		
K2	zwak lemig zand	74	60	79
L1	grof zand	126		
L2	zwak lemig zand	80		
M1	grof zand	182	67	8
M2	zwak lemig zand	108	95	87
N1	grof zand	212	76	6
N2	zwak lemig zand	108		
O1	grof zand	87	115	72
O2	grof zand	111		
P1	grof zand	79	42	39
P2	zwak lemig zand	71		
Q1	grof zand	152	201	72
Q2	zwak lemig zand	118		

BIJLAGE D

BESCHRIJVING FILMPJES DRUKPATRONEN

D1 Proeven op locatie A

Proef 2

Injectie op filter I2 (395 - 415)

Geïnjecteerd gedurende 58 uur

Injectiedruk 360 cm wk 0 - 48 uur en 250 40 - 58 uur

Flow onbekend

Proef 3

Injectie op filter I1

Geïnjecteerd gedurende 166 uur

Injectiedrukken:

- 320 cm wk 2 - 24,5 uur
- 370 cm wk 25 - 28 uur
- 460 cm wk 25,5 - 48 uur
- 500 cm wk 49 - 74 uur

Injectie op I1 en D1

- 630 cm wk 76 - 166 uur
- geen injectie 166 - 183 uur

Flow onbekend

Proef 4

Injectie op filter I2 (395 - 415)

Geïnjecteerd gedurende 133 uur

Injectiedruk 350 cm wk

Flow onbekend

Proef 5

Injectie op filter I2 (395 - 415)

Geïnjecteerd gedurende 48 uur

Injectiedruk 470 cm wk

Flow onbekend

Proef 6

Injectie op filter I2 (395 - 415)

Geïnjecteerd gedurende 30 uur

Injectiedruk 470 cm wk

Geen injectie 30 - 49 uur

Flow onbekend

D2 **Proeven op locatie B**

Proef 1

Injectie op filter O2 (529 - 549)
Geïnjecteerd gedurende 95 uur
Injectiedruk 400 cm wk 0 - 22 uur
Flow 0 l/uur
Injectiedruk 470 cm wk 22 - 93
Flow 30 - 60 l/uur

Proef 3

Injectie op filter O1 (575 - 595)
Geïnjecteerd gedurende 72 uur
Injectiedruk 520 cm wk 2 - 24 uur
Flow 50 - 55 l/uur
Injectiedruk 570 cm wk 24 - 72
Flow 65 - 80 l/uur
Geen injectie 72 - 90
Flow 0 l/uur

Proef 7

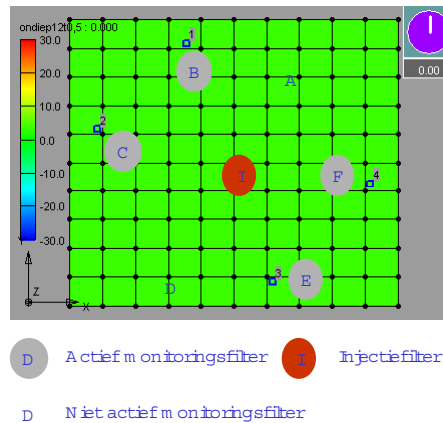
Injectie op filter O1 (575 - 595)
Geïnjecteerd gedurende 90 uur
Injectiedruk 590 cm wk 0 - 1,5 uur
Flow 0 l/uur
Injectiedruk 790 cm wk 1,5 - 90
Flow 585 - 615 l/uur
Geen injectie 90 - 92
Flow 0 l/uur

D3 Filmpjes

Proef 12

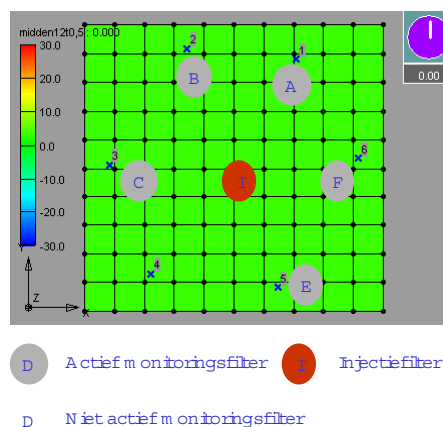
Ondiep

In het ondiepe pakket verandert de druk nauwelijks gedurende de eerste 20 uur van de injectie. Na 20 uur loopt de druk bij filter 3 (E1) op de hoogste druk na 21 uur. De druk schommelt dan tot 24 uur na de injectie op dit punt en loopt dan terug na nul. Er zijn dan tot 49,5 uur na de injectie geen noemenswaardige drukveranderingen meer. Na 49,5 uur daalt de druk tot onder het nulpunt bij filter 4 (F1) tot ongeveer 52,5 uur na de injectie. De druk is daarna in dit pakket weer overall gelijk aan de druk voor de injectie tot aan het einde van de injectie.



Midden

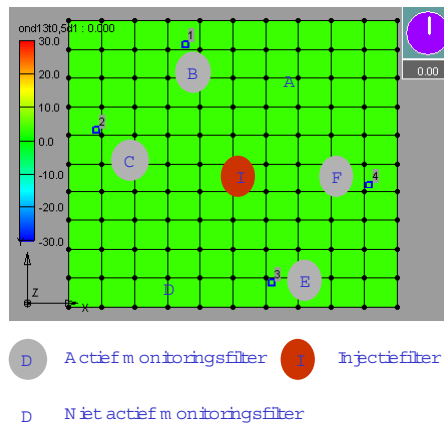
Drie uur na het begin van de injectie begint de druk op te lopen bij filter 5 (E2) en na 11 uur ook bij filter 6 (F2). De druk daalt dan weer tot er na 15 uur alleen nog maar een licht verhoogde druk is bij filter 5. De druk loopt daarna langzaam op bij filter 5 waarbij na 21 uur de hoogste druk wordt gemeten. Deze hoge druk houdt aan tot 23,5 uur na de injectie waarna de druk snel daalt tot het niveau voor de injectie. Tot het eind van de injectie blijft de druk dan onveranderd.



Proef 13

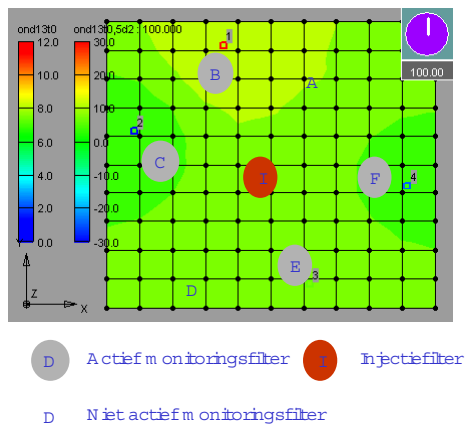
Ondiep deel 1

De eerste 55 uur zijn alleen wat drukschommelingen te zien bij filter 1 (B). Vanaf 78 uur neemt de druk toe in de filters 1 (B), 3 (E) en 4 (F), met de hoogste drukken op 81 uur. Daarna daalt de druk weer en tot ongeveer 0 op tijdstip 100 uur.



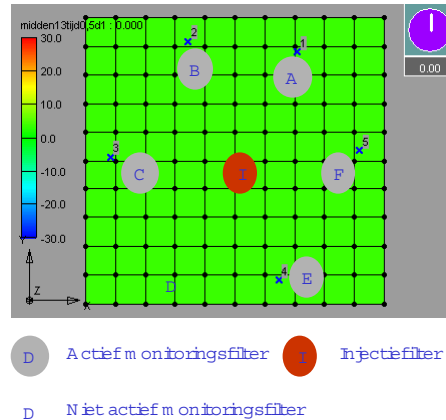
Ondiep deel 2

Bij filter 4 wordt een onderdruk gemeten tussen de 130 en 142 uur. Na 145 uur wordt er een onderdruk bij filter 3 gemeten die zich uitbreidt tot filter 4 op 149 uur. Vanaf dat moment manifesteert zich de onderdruk met name bij filter 4. Vrij snel na het einde van de injectie (166 uur) wordt de druk weer 0 bij filter 4. Vanaf 171 uur daalt de druk weer met een laagste punt op 174 uur om vervolgens weer langzaam te stijgen.



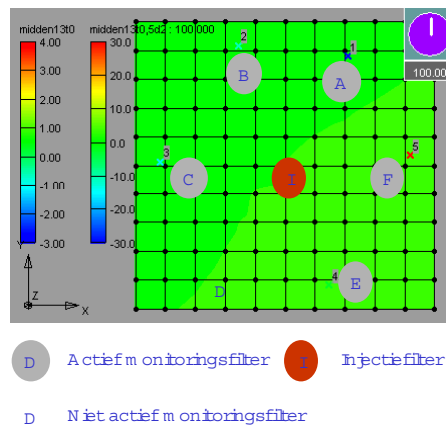
Midden deel 1

De eerste drukveranderingen treden 16 uur na de injectie op bij filter 4 (E2). Na 30 uur is de druk weer ongeveer nul. De volgende drukverandering begint dan 51 uur na de injectie bij filter 1 (A2). De druk daalt hier gestaag onder nul om vervolgens weer langzaam toe te nemen tot nul 70 uur na de injectie. Vanaf 70 uur tot 100 uur na de injectie schommelt de druk bij filter 5 tussen de nul en de 20.



Midden deel 2

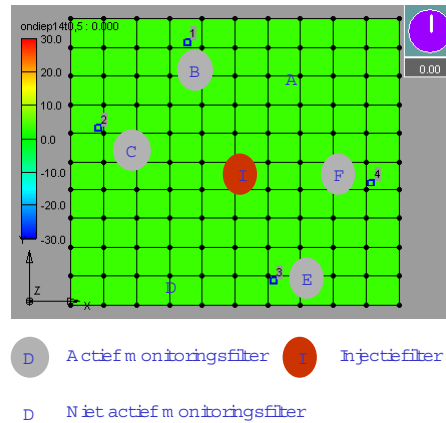
Tot 116 uur na het begin van de injectie verandert er vervolgens weinig. Tussen de 116 en 121 uur is er tijdelijk een drukverhoging bij de filters 4 en 5 waar te nemen. De periode tussen de 125 en 166 uur wordt gekenmerkt door onderdrukken bij de filters 1 en 5 met een laagste druk op 151 uur. Na 166 uur wordt de injectie stopgezet, maar wordt de druk nog wel gemonitord. In deze periode na de injectie worden nog onderdrukken gemeten. Het valt op dat op tijdstip 175 uur een lage druk wordt gemeten bij filter 5.



Proef 14

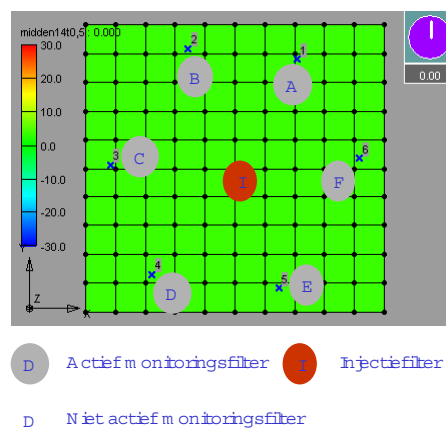
Ondiep

De eerste 10 uur van de injectie zijn wat lichte druktoenames te zien bij filter 3 (E). Tot 66 uur na de injectie verandert er vervolgens nauwelijks iets. Vanaf dat tijdstip neemt de druk toe in de filters 1, 3 en 4. In deze filters bereikt de druk een maximum rond de 85 uur. De druk schommelt een beetje bij deze filters op een verhoogd niveau om vanaf ongeveer 116 uur na de injectie af te nemen tot een licht verhoogd drukniveau tot aan het einde van de monitoring.



Midden

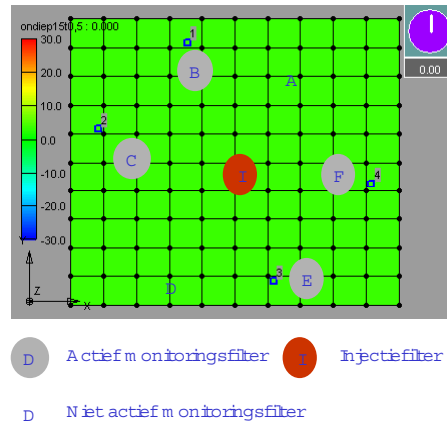
De eerste 66 uur zijn er alleen wat licht drukveranderingen waar te nemen bij filter 4 (D). Vanaf 66 uur begint de druk ook bij filter 1 (A) toe te nemen. De druk stijgt bij beide filters tot 85 uur en schommelt dan op een verhoogd niveau tot ongeveer 117 uur en daalt vervolgens tot het einde van de injectie.



Proef 15

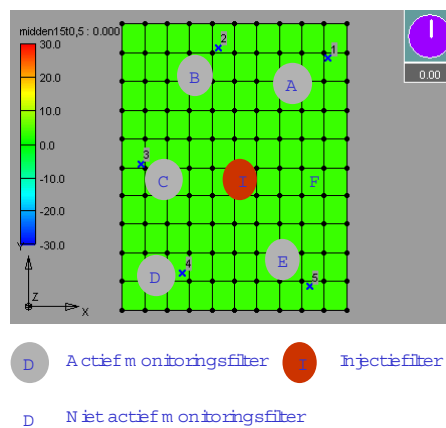
Ondiep

Tijdens de gehele injectieperiode zijn alleen enkele drukschommelingen rondom filter 3 (E) waar te nemen.



Midden

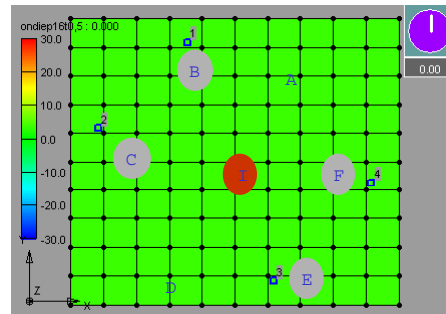
Tijdens de eerste 50 uur van de injectie worden er lichte onderdrukken gemeten in de filters 3 (C) en 5 (E). Na 48 uur wordt de injectie stopgezet. De druk bij filter 3 is na 50 uur weer ongeveer 0 en verandert in het vervolg nauwelijks meer. Van 50 tot 92 uur wordt er bij filter 5 een onderdruk gemeten met een laagste druk rond de 60 uur. In deze periode wordt er ook een onderdruk gemeten bij filter 1 (A).






Proef 16

Ondiep

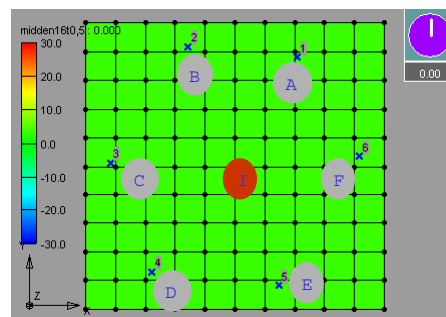
Tijdens de gehele injectieperiode zijn slechts geringe drukveranderingen waar te nemen. Deze drukveranderingen treden vooral op rond filter 3 (E).






-  Actief monitoringfilter  Injectiefilter
 Niet actief monitoringfilter

Midden

Tussen de 7 en 27 uur wordt er bij filter 5 (E) een licht onderdruk gemeten. In de overige filters worden gedurende de gehele injectieperiode geen noemenswaardige drukveranderingen gemeten.

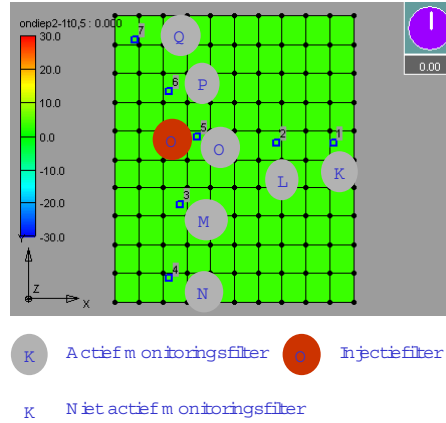


-  Actief monitoringfilter  Injectiefilter
 Niet actief monitoringfilter

Proef 2.1

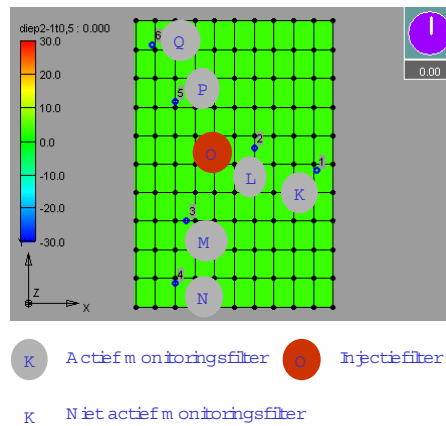
Ondiep

De eerste 70 uur zijn er geen noemenswaardige drukveranderingen waar te nemen. Vanaf 70 uur zijn er lichte onderdrukken rond de filters 3 (M), 4 (N) en 7 (Q) waar te nemen.



Diep

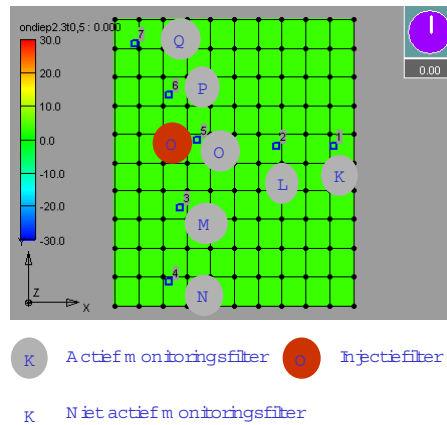
Tijdens de gehele injectieperiode zijn er geen noemenswaardige drukveranderingen.



Proef 2.3

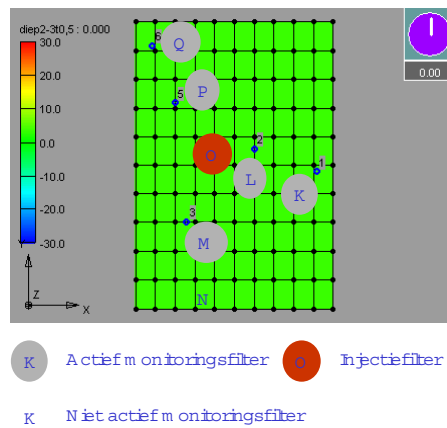
Ondiep

Vanaf het begin van de injectie neemt de druk toe rond filter 2 (L), na 10 uur neemt de druk ook toe in de filters 1 (K), 3 (M), 4(N) en 5 (O). De hoogste drukken worden rond de 30 uur gemeten, waarna de drukken weer langzaam afnemen. Na 50 uur is er alleen rond filter 2 een licht verhoogde druk. Vanaf 55 tot 90 uur zijn er drukveranderingen rond de filters 1 (K) en 5 (O) waar te nemen.



Diep

Tijdens de gehele injectieperiode zijn er drukveranderingen rondom de filters 3 (N) en 5 (Q). Na 35 en 73 uur bereiken deze filters de hoogste drukken.



BIJLAGE E
Qh-KROMMEN

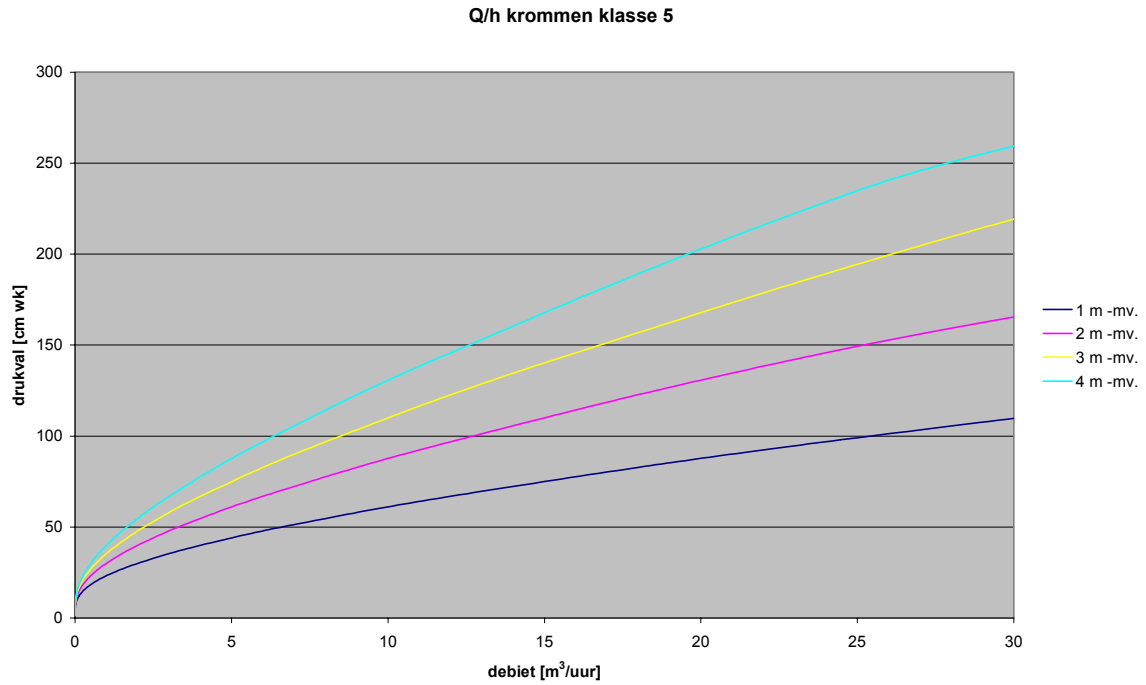


Fig. E1. Qh-kromme voor grof zand.

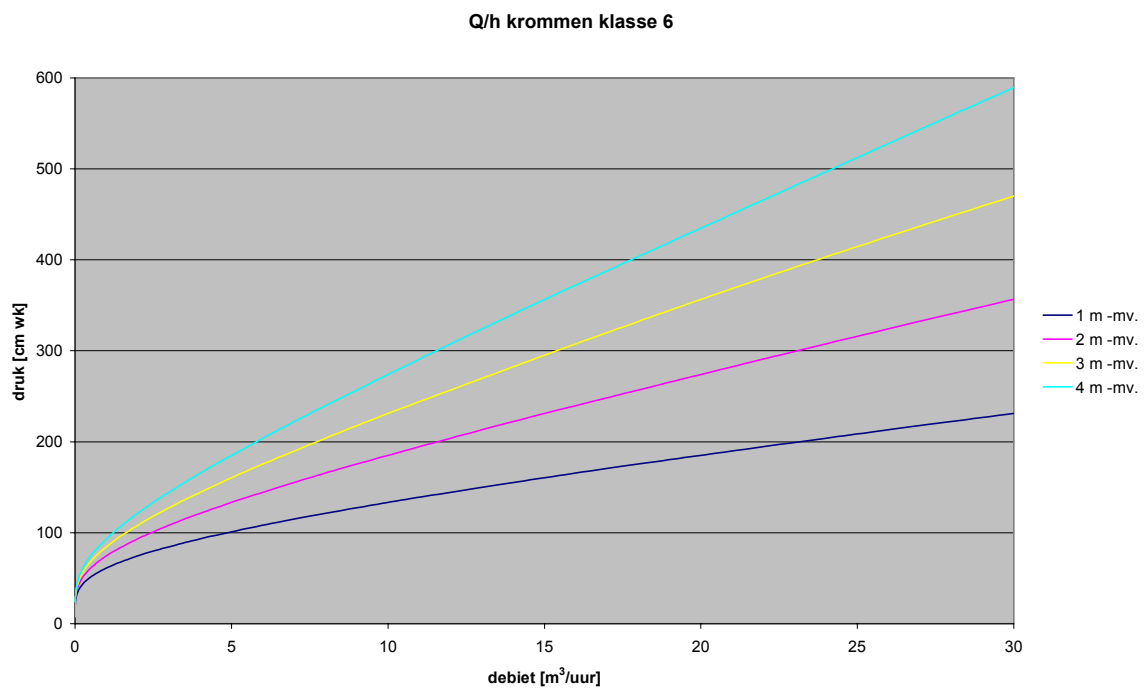


Fig. E2. Qh-kromme voor fijn zand.

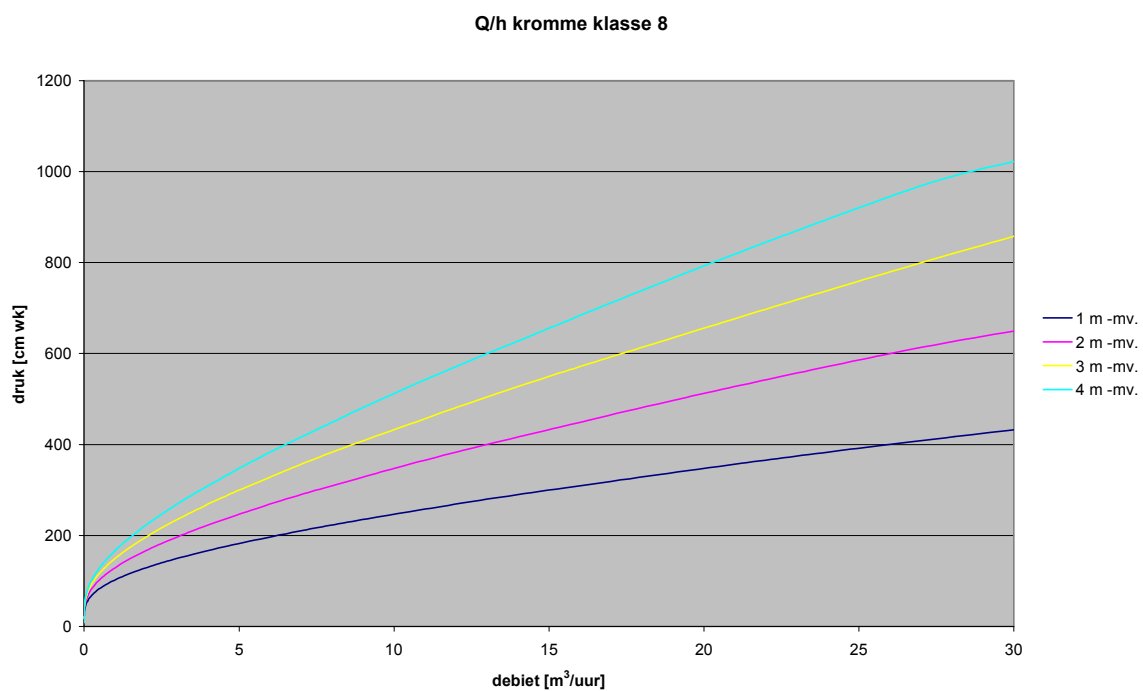


Fig. E3. Qh-kromme voor zwak leemhoudend zand.

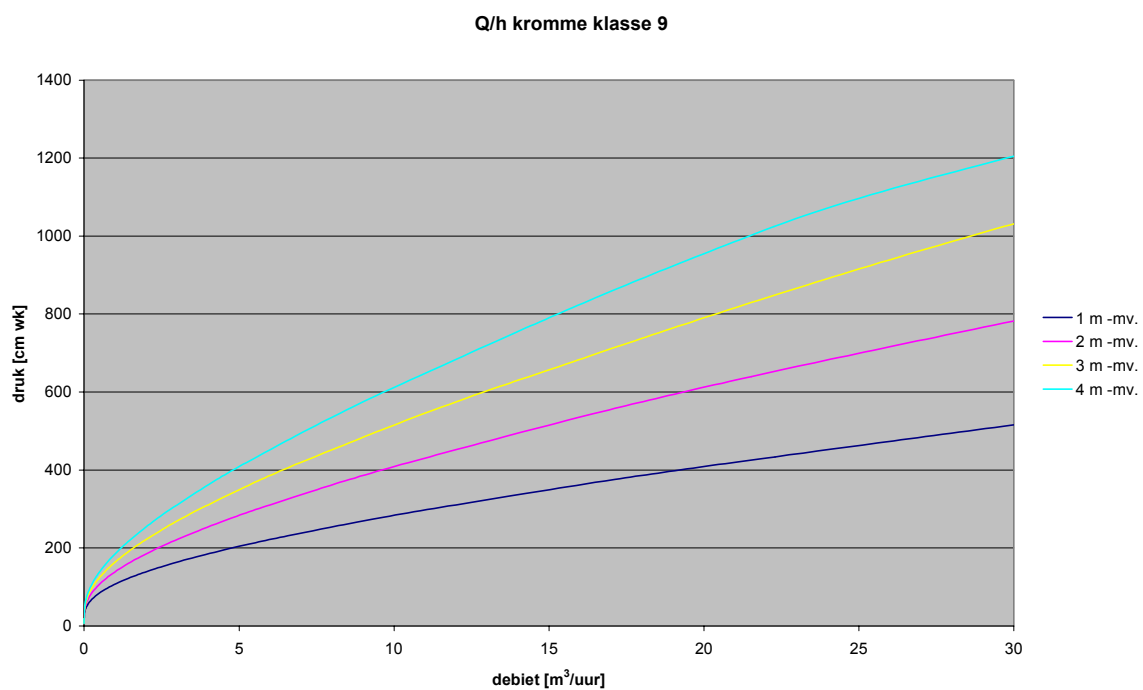


Fig. E4. Qh-kromme voor sterk leemhoudend zand.

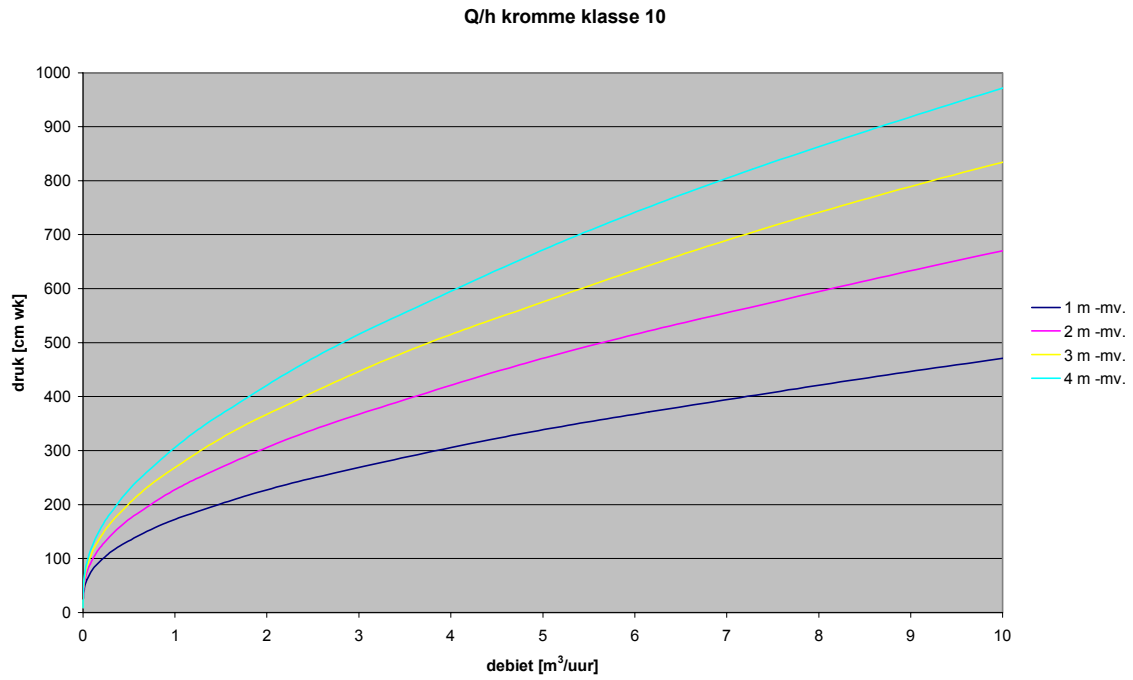


Fig. E5. Qh-kromme voor zandige leem.

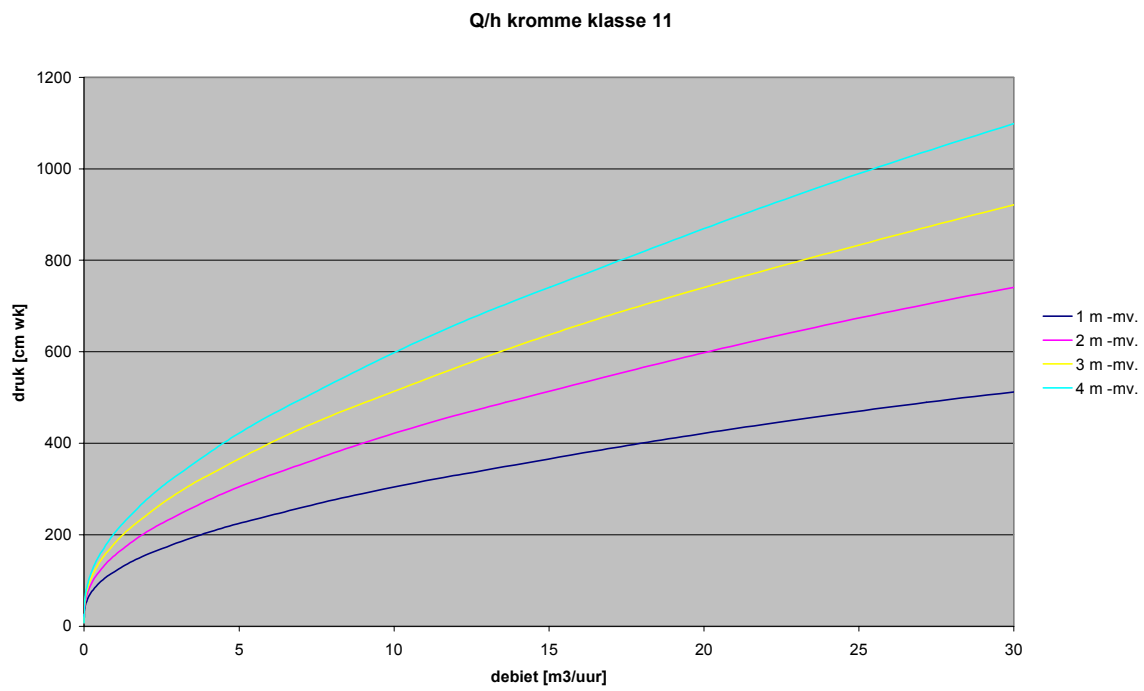


Fig. E6. Qh-kromme voor lichte zavel.

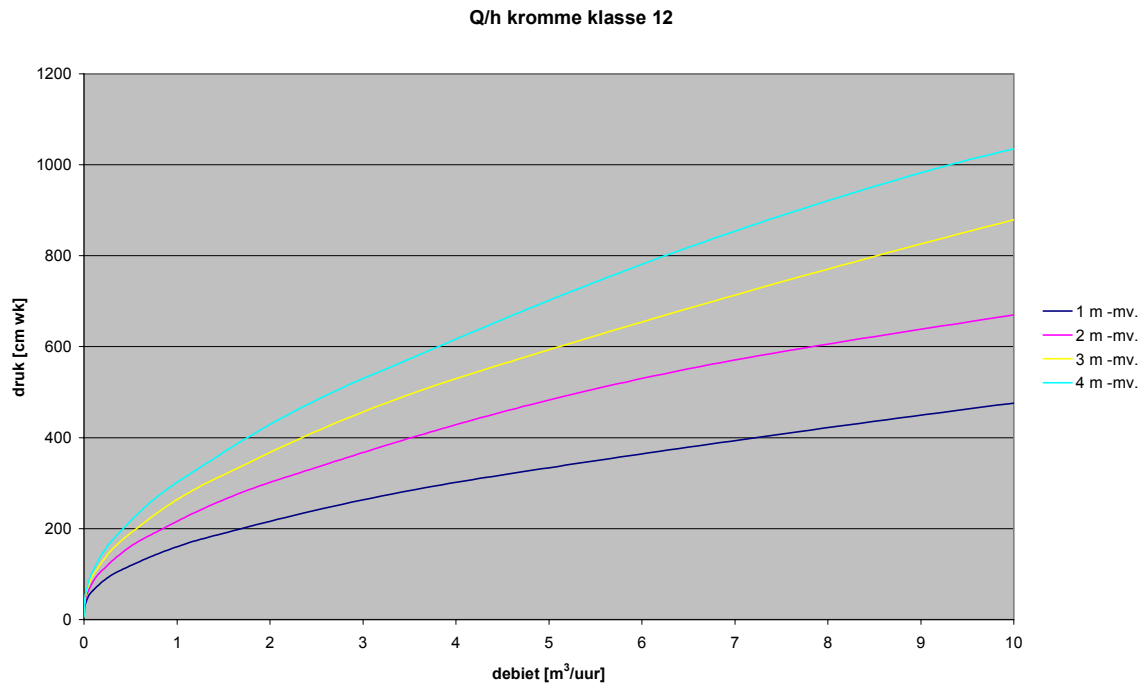


Fig. E7. Qh-kromme voor zware zavel.

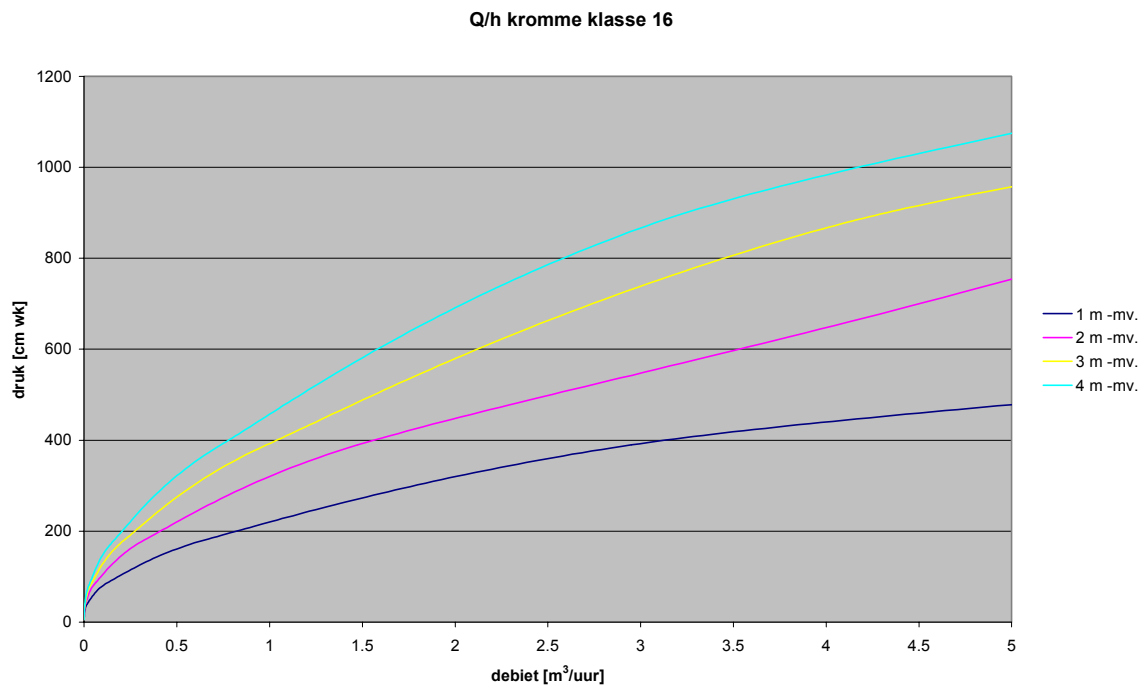


Fig. E8. Qh-kromme voor lichte klei.

Q/h kromme klasse 17

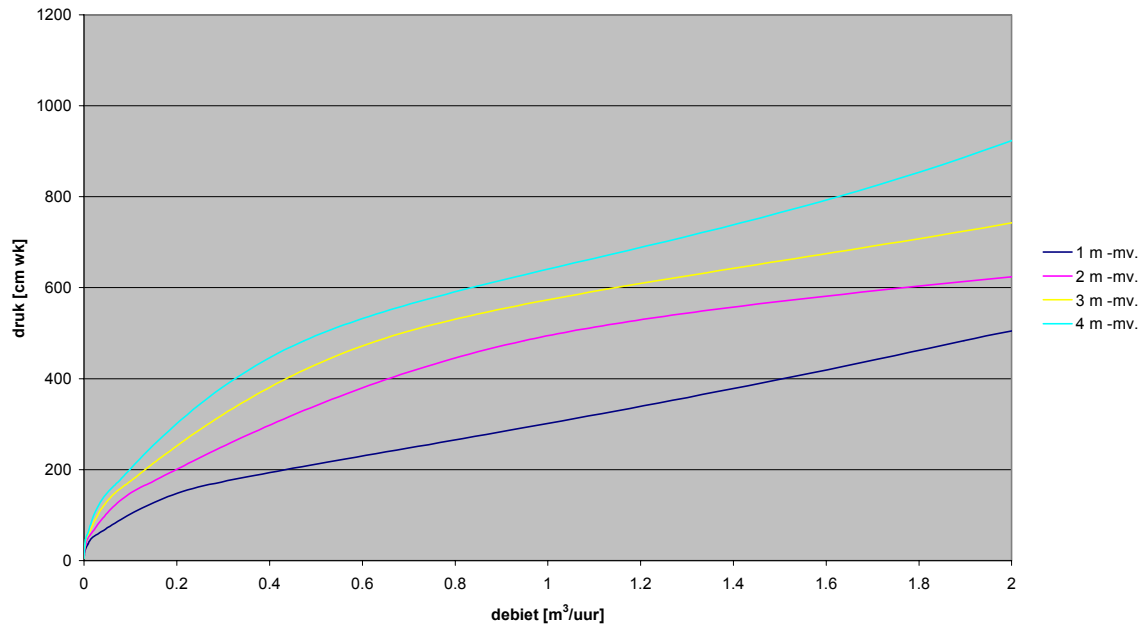


Fig. E9. Qh-kromme voor lichte klei.

AIR SPARGING EXPERIMENTS

F1 Introduction

The purpose of this work is to investigate the use of air sparging as a remediation tool for aquifers contaminated with entrapped LNAPLs in the saturated zone. The objective is to break up and displace entrapped lenses of free product with air to increase the surface to volume ratio thus enhancing bioremediation.

As a first step towards achieving this goal, the experiment outlined in this report focuses on investigating the possibility of oil displacement by air sparging in a laboratory sand column experiment.

F2 Background

When spilled at the land surface, LNAPLs will travel vertically in the vadose zone under the influence of gravity and capillary forces. If sufficient quantities of LNAPLs are present, the advancing front will eventually reach the capillary zone and begin to accumulate. As LNAPL continues to accumulate, the capillary zone may disappear and the floating layer will rest on the water table. Seasonal water table fluctuations, either locally or regionally, can emplace LNAPL below the water table if water level rises faster than the oil table can rise. The LNAPL layer will become entrapped in the saturated zone and is difficult to mobilize by groundwater extraction [Hunt and Sitar, 1988a].

Investigating the behaviour of LNAPLs in the subsurface using a sandbox experiment, Reinders [1995] showed that these entrapped pools of free product could only be re-mobilized when the water table was lowered below its level when the pool was originally formed. Lowering the water table by pumping is not always practical in the field and is not always successful [Hunt and Sitar, 1988a]. Removal by dissolution is a possibility but the process is mass transfer limited and will require decades to take place.

Investigating the theory of multiphase flow transport, Hunt and Sitar [1988a] showed that for a given porous medium, the only way to reduce residual saturation and ganglion sizes was either to increase groundwater velocity or decrease the NAPL-water interfacial tension.

In a laboratory sand column study, Hunt and Sitar [1988b] evaluated LNAPL mobilization by water flooding and steam propagation. They showed that no separate phase contaminant could be displaced from the column at water flow velocities up to 15 m/d. Given practical limits on water flooding rates, considerable effort has been directed toward lowering interfacial tensions by means of surfactants. The effectiveness of surfactants was found to be limited by surfactant solubility and the reduction in the relative water permeability of the medium due to pore plugging by emulsified gasoline. Further contamination of drinking water aquifers by surfactants was also undesirable.

In Hunt and Sitar's experiments [1988b], steam was shown to displace the separate phase liquid from the column as a slug just ahead of the steam condensation front at injection velocities equivalent to 1.5 m/d for the condensed steam. They demonstrated that by a water flooding following steam flooding, contaminant removal was complete.

In this study, we are interested in investigating the displacement of the residual oil phase in a sand column by air injection. The objective is to displace the entrapped residual oil by decreasing the oil-water interfacial tension using air sparging.

A number of laboratory studies of air sparging have been carried out in the past [Ji et al., 1993; Reddy et al., 1995; Reddy and Adams, 1997; Hein et al., 1997; Reddy and Adams, 1998]. However, the focus of these studies have been on understanding the effect of air flow, soil type, heterogeneity, air injection rate and the synergetic effects of co-contaminants on removal efficiency in saturated soils. To date, there is no published material on the evidence of oil displacement by air sparging.

F3 Description of apparatus and method

The experimental apparatus comprised a glass column with an internal diameter of 300 mm and a length of 1000 mm as shown in figure F1. The column was fitted with a stainless steel end plate at the bottom with a 6 mm diameter air entry and drain point. Each of these points was fitted with a 6 mm ball valve to allow isolation. A stainless steel mesh was put in place to prevent sand from entering the drain point. The air entry point was situated at the centre of the column and the drain point at half the radius.



Fig. F1. Experimental apparatus.

The sand used in the column was from the Lower Greensand deposits in Leighton Buzzard in England and had an uncompacted porosity of 45 % and a nominal effective size d_{10} of 0.55 mm. The column was filled slowly with wetted sand to avoid differential settling of the sand grains in

the column up to a height of 800 mm. Water was added to the sand to maintain the water level slightly above the sand level as sand was deposited into the column. Careful consideration was given to filling the column with sand and water to prevent preferential flow paths from developing. No compaction forces were exerted during the experiment.

Once the sand had been placed, the water content of the column was drained. The sand column was then fully saturated with 18 litres of diesel to create a non-wetting oil phase. The diesel was spiked with 70 ml of toluene to increase its water soluble content. However, aqueous phase hydrocarbon was not measured in the experiment reported here.

To make the product visible, Sudan IV red dye was added to the oil. This dye is insoluble in water. The column was then drained of free liquid. 1 litre of water and 13.2 litres of product were recovered.

Water was added from above to the sand column to bring the liquid level 20 mm above the top of the sand. With the addition of water, 2 mm of oil moved to the surface.

The column was left to stabilize for 16 hours. A further 18 mm of oil accumulated on the water surface after this time. This amounts to a total oil volume of:

$$\pi \frac{D^2}{4} h = 3.14 \cdot \frac{300^2}{4} \cdot 20 = 1413717 \text{ mm}^3 = 1.4 \text{ litres}$$

where:

D is the diameter of the sand column;

h is the thickness of the oil layer.

1.2 litres of this oil was pumped from the surface using a peristaltic pump and flexible tubing. 2 - 3 mm (i.e. about 0.2 litre) of the product was left on the water. A simple mass balance showed that $(18.07 - 13.2 - 1.4 =) 3.47$ litres of product were still trapped in the sand column.

Table F1 summarizes the results obtained at the various stages of the experiment.

F4 **Results**

The air sparging experiments were carried out in stages depending on the outcome of each stage. The results are reported here.

Stage 1

Air pressure was increased slowly from less than 0.5 psi to 1.5 psi. In so doing, a sudden increase in air pressure was observed before the level dropped again. Air bubbles started to appear at 1.5 psi which suggests that the pore entry pressure was 1.5 psi. The experiment was left to run at this pressure. The air distribution was uniform across the surface of the sand. Within 15 minutes, the oil layer thickness increased from 3 to 5 mm and the water depth above the sand increased to 25 mm. Within 45 minutes, the oil layer had increased to 6 mm and the water depth to 27 mm. The situation stabilized after 45 minutes from the beginning of the air sparging and no additional effects were observed in the following 20 hours. This situation lead us believe that preferential air flow paths have been developed in the column soon after air sparging had started and the existing oil on these flow paths has been collected on the surface of the water in the first 45 minutes.

The apparatus was switched off for 48 hours. An additional millimetre of oil accumulated on the surface of the water during this time from the gradual air bubble movement to the surface.

Stage 2

Air sparging was started again to investigate the development of new preferential pathways. The air pressure was slowly brought up to the pore entry pressure of 1.5 psi and kept at this pressure. The depth of the oil layer increased from 7 mm to 9 mm over 2 hours. It increased to 11 mm in the following 17 hours and stabilized at 12 mm 24 hours after the beginning of the air sparging. Sparging continued for another 19 hours without additional effect.

This experiment showed that new preferential pathways have indeed been developed in the sand column but once again, the system had reached steady state after a while. The air was turned off for 24 hours in order to allow any developed preferential pathways to deteriorate. The oil layer thickness was reduced to 11 mm after one day. This is believed to be more a result of release of entrapped air in the oil layer rather than evaporation.

Stage 3

Air sparging was started again. On restarting the air flow at 1.5 psi, the oil layer slowly increased from 11 mm to 13 mm after 45 minutes. The thickness was 15 mm after 3 hours and stabilized at 17 mm over a 24 hour period.

Stage 4

At this stage, a regime of air on and air off for alternating periods of half an hour was applied to the column to see whether more oil would be displaced in the column once steady state has been reached. Initially, an air pressure of 2 psi was applied but this was reduced to 1.5 psi after 4 hours. While sparging at 2 psi, the oil layer increased from 17 mm to 21 mm in 4 hours. When sparging started at 1.5 psi, the oil layer reduced to 18 mm in 2 hours. These results suggest that some of the measured depth of oil was contributed to by entrapped air bubbles at 2 psi.

During this period, it was noticeable that a light brown emulsified substance was appearing in the oil layer between the diesel and the water layer (see fig. F2). A sample of this product was later analysed under the microscope and the results are discussed later in this report.

The air was turned off for 66 hours. The entire oil layer floating on the water surface was then pumped out of the column using a peristaltic pump and flexible tubing. This removed approximately 1 litre of oil.

Stage 5

At this stage, the air was turned back on at a supply pressure of 1.5 psi. Within an hour, an oil layer started to form (see fig. F3).

After 2 hours of operation the supply air pressure was switched between 1.5 and 2 psi on a 5 minute cycle for a period of 1 hour. This cycling of the gas supply did not appear to enhance removal of oil from the sand. The air was then left on at 2 psi for a further hour with no obvious increase in the oil removed. The air was then turned off for 24 hours and the oil layer pumped out, giving 0.1 litre of diesel removed.

This part of the experiment shows that alternating the rate of air injection does not necessarily create new preferential pathways and does not make any difference to the recovery of oil once the system has reached a steady state. At this stage, it was apparent that little more oil will be recovered from the column by continuing air sparging.

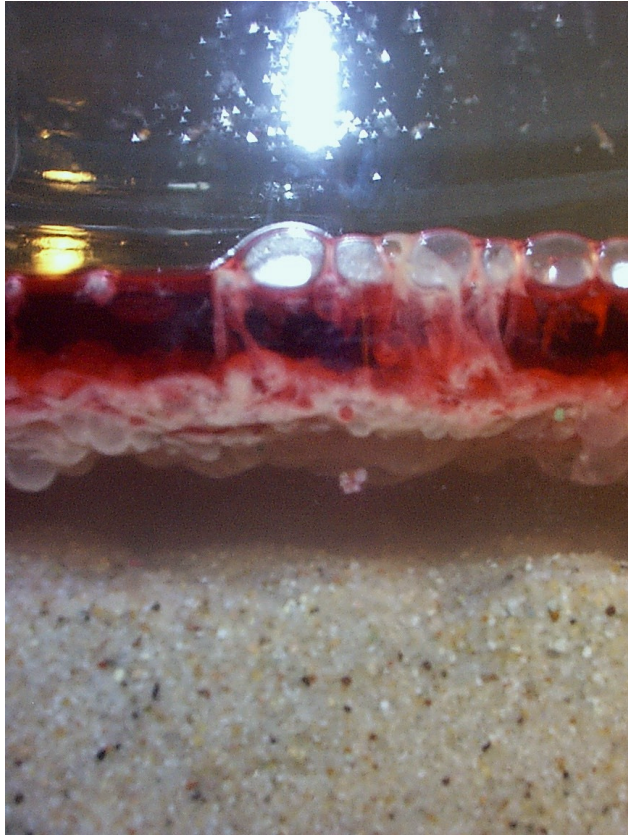


Fig. F2. Emulsion layer developing on the water layer.

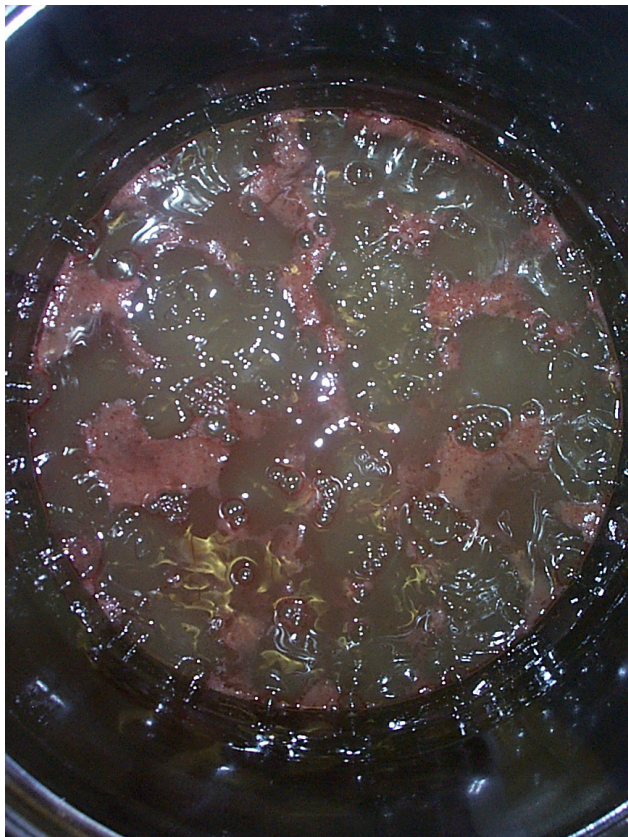


Fig. F3. Developing oil layer.

Stage 6

It was then decided to remove the top 200 mm of sand from the column and wash it with clean water to find out whether more oil was entrapped in the sand. Although a sheen of oil was apparent on the surface of the water, no measurable quantity of oil was detected. The air was turned back on in the remaining 600 mm of sand at the pore entry pressure of 1.25 psi and left running overnight. After 20 hours, a diesel layer of approximately 5 mm had developed including an emulsion phase. The air was turned off for 2 hours and the oil layer pumped out. This yielded an additional 0.3 litre of the mixture. This experiment helped establishing mass balance and showed the effect of compaction on oil displacement by air sparging. In the upper part of the sand column, all the residual oil had been displaced by the original air sparging while the middle and lower parts had still some entrapped oil.

Stage 7

The experiment continued with removing a further 140 mm depth of sand from the column and washing it with water. Although a sheen of oil was again apparent on the surface of the water, no measurable quantity of oil was detected. The air was turned back on in the remaining 460 mm of sand in the column a pore entry pressure of 1 psi. It was then left to gently sparge overnight. After 20 hours, a 5 mm layer of oil and emulsion had developed on the surface of the water. The air was turned off for 2 hours and the oil layer pumped out. This yielded an additional 0.25 litre of product. This experiment confirmed the findings of Stage 6 with regard to the effect of compaction on oil displacement by air sparging. The upper part of the sand column was free from any oil while the lower part had still some entrapped product.

Stage 8

A further 200 mm depth of sand was then removed from the column and washed with water. 150 ml of product was recovered this time. The air was turned back on in the remaining 260 mm of sand at the pore entry pressure of 0.75 psi for 20 hours. 2 mm of oil accumulated on the surface during this time. Contrary to what was observed until now, the air flow pattern was not well distributed throughout the column at this pressure but was concentrated in a 100 mm diameter circle in the middle of the column. The air was turned off for 2 hours and the oil layer was pumped out. This yielded an additional 0.2 litre of product. The remaining 260 mm of the sand in the column were not taken out due to the difficulty of access. However, the air pressure was increased to 5 psi for 2 hours to agitate the sand but no more oil was observed on the surface of the water.

It was noted during the experiments that the colour of the recovered oil became lighter as we progressed through the various stages of air sparging. This can be explained by the gradual adsorption of the dye to the sand.

F5 Mass Balance

A mass balance presented in table F1 shows that 1.67 litres of oil are unaccounted for at the end of the experiment. This is equivalent to 9 % of the original volume of oil added to the column.

Of the 3.47 litres of oil entrapped in the sand column as a residual phase, 1.65 litres (48 %) were removed by air sparging and 0.15 litre (4 %) was washed with water. This amounts to 1.8 litres or 52 % of the total residual phase.

The remaining 48 % seem to have been lost by evaporation, dissolution and adsorption. Experiments are currently undergoing to calculate the adsorbed phase.

Table F1. Mass balance.

stages	activity	oil on surface of the water (mm)	oil pumped out (ml)
	18.07 litres of oil in column		
	drain saturated oil column		13.2
	system stabilizes	20	
	pump out oil		1.2
	remaining oil on the surface	2 - 3	
stage 1	sparging at 1.5 psi for 24 hours	6	
	switch off for 66 hours	7	
stage 2	sparging at 1.5 psi for 43 hours	12	
	switch off for 24 hours	11	
stage 3	sparging at 1.5 psi for 24 hours	17	
stage 4	sparging on and off at 2 psi for 4 hours	21	
	sparging on and off at 1.5 psi for 2 hours	17	
	switch off for 66 hours	18	
	pump out oil		1
stage 5	sparging at 1.5 psi for 2 hours	0 - 1	
	sparging alternatively at 2 psi and 1.5 psi every 5 mn for 1 hour	1	
	sparging at 2 psi for 1 hour	1	
	switch off for 24 hours	1	
	pump out oil		0.1
stage 6	remove 200 mm of sand wash it with water pump out oil		0
	sparging at 1.25 psi for 20 hours	5	
	switch off for 2 hours		
	pump out oil		0.3
stage 7	remove 140 mm of sand wash it with water pump out oil	0	0
	sparging at 1 psi for 20 hours	5	
	switch off for 2 hours	5	
	pump out oil		0.25
stage 8	remove 200 mm of sand wash it with water pump out oil		0.15
	sparging at 0.75 psi for 20 hours	2	
	switch off for 2 hours	2	
	pump out oil		0.2
	sparging at 5 psi for 2 hours pump out oil		0
total oil in: 18.07 litres			total oil out: 16.4 litres

F6 Microscopic results

Three samples have been taken from the recovered oil at Stage 5, 7 and 8 after air sparging. These samples have been analysed under the microscope to look at the structure of the emulsion observed during the experiments. The results showed a presence of microbial activity in the water phase of all the samples. As expected, an increase in microbial activity was observed with time. Figure F4 shows the different phases observed in the oil in a sample taken at Stage 8. The circular elements are diesel droplets while the filaments represent the emulsion of oil and water. The darker colours surrounding the oil could be a microbial film.

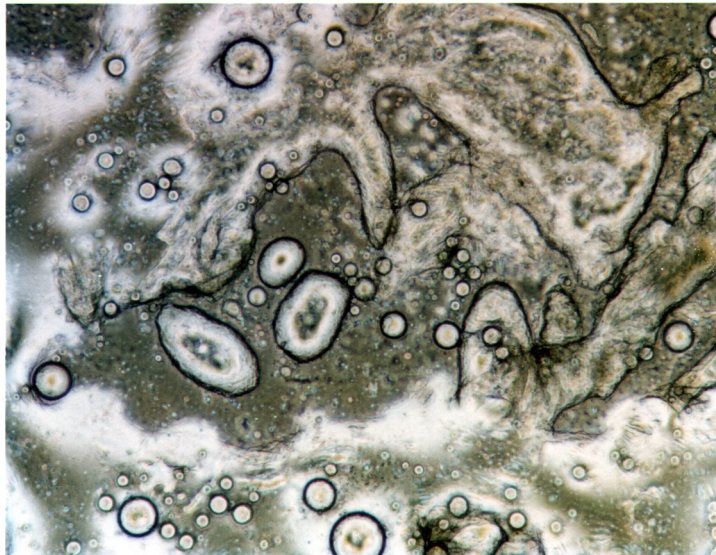


Fig. F4. Emulsion layer under the microscope.

Figure F5 is similar to figure F4 but viewed under crossed polarising filters to enable identification of birefringent crystalline materials (sand and waxes for example). Additional small birefringent particles could be observed on this figure. These have not yet been identified and analyses are currently under way to establish whether these are sandy or oily in nature.

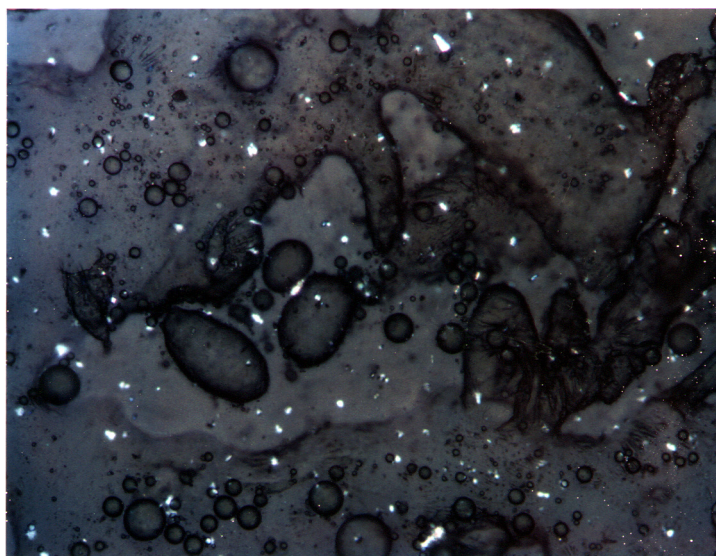


Fig. F5. Emulsion layer under the microscope under crossed polarising filters.

F7 **Conclusions**

The sand column experiments showed that oil is indeed being displaced by air sparging. It was noted during the experiments that preferential air pathways were developing relatively quickly after the air sparging had started and the system reached steady state. It was found that the best way to displace more oil once steady state was achieved was to carry out intermittent sparging. This indicates that under the conditions of this experiment, new preferential pathways were developing every time the air sparging was switched on after a period of rest.

This conclusion however, cannot be easily extrapolated to the field for two reasons. The first is the effect that soil compaction will have on oil recovery as observed in these experiments, ie the less compacted the soil, the more oil is recovered through sparging.

The second reason is the effect of heterogeneity on air distribution. From a probabilistic point of view, the likelihood of new random air flow paths forming every time air sparging is started is higher in a uniform sandy aquifer than in a heterogeneous aquifer.

The results of the experiments also showed that increasing or alternating air pressure did not seem to improve oil recovery once the steady state was reached.

An emulsion was formed in the oil layer as air sparging progressed with time. This emulsion appears to consist of the heavier ends of diesel. This may have some consequences in practice since heavier material may be forming and jeopardising oil displacement and clean-up when air sparging.

The experiments also showed the presence of microbial activity which increased with time.

The mass balance showed that 48 % of the residual oil phase was removed by air sparging and 4 % was washed with water. This amounts to 52 % of the total residual phase. The remaining 48 % seem to have been lost by evaporation, dissolution and adsorption.

F8 **References**

Hein, G.L., J.S. Gierke, N.J. Hutzler and R.W. Falta, 1997.

Three-dimensional experimental testing of a two-phase flow modeling approach for air sparging. *Ground Water Monitoring Review*, pp. 222-230.

Hunt, J.R. and N. Sitar, 1988a.

Nonaqueous Phase Liquid Transport and Cleanup. 1. Analysis of Mechanisms. *Water Resources Research*, vol. 24, no. 8, pp. 1247-1258.

Hunt, J.R. and N. Sitar, 1988b.

Nonaqueous Phase Liquid Transport and Cleanup. 2. Experimental studies. *Water Resources Research*, vol. 24, no. 8, pp. 1259-1269.

Ji, W., A. Dahmani, D.P. Ahlfeld, J.D Lin and E. Hill, 1993.

Laboratory study of air sparging: air flow visualisation. *Ground Water Monitoring Review*, pp.115-126.

Reddy, K.R., S. Kosgi and J. Zhou, 1995.

A review of in-situ air sparging for the remediation of VOC-contaminated saturated soils and groundwater.

Hazardous Waste & Hazardous Materials, vol. 12, no. 2, pp. 97-118.

Reddy, K.R. and J.A. Adams, 1997.

The effect of grain size distribution on air sparging efficiency.

In-situ and on-site bioremediation: Volume 1, Battelle Press, pp. 165-172.

Reddy, K.R. and J.A. Adams, 1998.

Systems effects on Benzene removal from saturated soils and ground water using air sparging.

Journal of environmental Engineering, pp. 288-299.

Reinders, J.E.A., 1995.

The behaviour of non-aqueous phase liquids in the sub-surface. Preliminary results of kerosene spill experiments in a sandbox.

Shell Research Ltd.