

NOBIS
MOGELIJKE TOEPASSING VAN HYDRAULIC
FRACTURING BIJ IN SITU SANERINGEN

ir. J. Bakker (HASKONING B.V.)
dr.ir. M. Hinsenveld (HASKONING B.V.)

augustus 1997

Gouda, CUR/NOBIS

Auteursrechten

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

Het is toegestaan overeenkomstig artikel 15a Auteurswet 1912 gegevens uit deze uitgave te citeren in artikelen, scripties en boeken, mits de bron op duidelijke wijze wordt vermeld, alsmede de aanduiding van de maker, indien deze in de bron voorkomt. "©"Mogelijke toepassing van hydraulisch fracturing bij in situ saneringen", augustus 1997, CUR/NOBIS, Gouda."

Aansprakelijkheid

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

Copyrights

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

It is allowed, in accordance with article 15a Netherlands Copyright Act 1912, to quote data from this publication in order to be used in articles, essays and books, unless the source of the quotation, and, insofar as this has been published, the name of the author, are clearly mentioned. "©"Possible applications of hydraulic fracturing for in situ remediations", August 1997, CUR/NOBIS, Gouda, The Netherlands."

Liability

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

Titel rapport

Mogelijke toepassing van hydraulische fracturing
bij in situ saneringen

CUR/NOBIS rapportnummer**Project rapportnummer****Auteur(s)**

ir. J. Bakker
dr.ir. M. Hinsenveld

Aantal bladzijden

Rapport: 29
Bijlagen: 10

Uitvoerende organisatie(s) (Consortium)

HASKONING B.V. (dr.ir. M. Hinsenveld, 024-3284224)

Uitgever

CUR/NOBIS, Gouda

Samenvatting

Dit rapport beschrijft de resultaten van een oriënterend literatuuronderzoek naar de toepassingsmogelijkheden van hydrofracturing in Nederland. Het project is uitgevoerd in opdracht van NOBIS en had een totale omvang van twee weken.

Hydrofracturing is een techniek waarbij door het onder hoge druk injecteren van een suspensie in de ondergrond één of meer doorlatende lagen worden gecreëerd. Hierdoor wordt de doorlatendheid vergroot. Hydrofracturing wordt veelal toegepast in combinatie met bodemluchtextractie. Het rapport gaat in op de techniek van de scheurvorming, de invloedsfactoren met betrekking tot de fracturing richting, vorm en lengte alsmede het volgen van het verloop van de fracturingen. Als toepassingsgebieden worden kleigrond, klei/veengrond en fijn zand met klei/leeminschakelingen genoemd.

In het rapport is het resultaat van een aantal proefprojecten beschreven. Daarnaast bevat het rapport referenties naar databases, literatuur en andere informatiebronnen.

Trefwoorden**Gecontroleerde termen:**

in situ

Vrije trefwoorden:

diffusie, doorlatendheid, injectie, luchtstrippen, vacuümextractie

Titel project

Mogelijke toepassing van hydraulische fracturing
bij in situ saneringen

Projectleiding

HASKONING B.V.
(dr.ir. M. Hinsenveld, 024-3284224)

Dit rapport is verkrijgbaar bij:

CUR/NOBIS, Postbus 420, 2800 AK Gouda

Report title
Possible applications of hydraulic fracturing
for in situ remediations

CUR/NOBIS report number

Project report number

Author(s)
ir. J. Bakker
dr.ir. M. Hinsenveld

Number of pages
Report: 29
Appendices: 10

Executive organisation(s) (Consortium)
HASKONING B.V. (dr.ir. M. Hinsenveld, 024-3284224)

Publisher
CUR/NOBIS, Gouda

Abstract

This report describes the results of limited literature research into the applicability of hydrofracture in the Netherlands. The project, with a total duration of two weeks, was conducted within the framework of NOBIS.

Hydrofracture, being a technology that uses high pressure injection of a suspension in the subsoil, is used to create one or more permeable fractures in the subsoil. These fracture lead to increased permeability. Hydrofracture is often applied in conjunction with vacuum extraction. The report describes the technique of fracturing as well as the influencing factors with respect to fracture formation, fracture direction, form and length, as well as monitoring of fracture progression. Suitable soil types are identified as clay, clay/peat and fine sands containing clay layers.

The report describes the results of a number of demonstration projects. Also contained in the report are references to data bases, literature and other information sources.

Keywords

Controlled terms:
in situ

Uncontrolled terms:
air stripping, diffusion, injection, permeability, vacuum extraction

Project title
Possible applications of hydraulic fracturing
for in situ remediations

Projectmanagement
HASKONING B.V.
(dr.ir. M. Hinsenveld, 024-3284224)

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

VOORWOORD

Dit rapport beschrijft de resultaten van een (voor)onderzoek naar mogelijke toepassingen van hydraulische fracturing bij in situ saneringen in Nederland. Het onderzoek is uitgevoerd in het kader van het NOBIS-programma en had een totale omvang van twee weken.

In het project is veel tijd besteed aan het lokaliseren van relevante informatie. Bedrijven zijn nog weinig open: niet alleen zijn er weinig publicaties verschenen, ook de mate van detail hierin is beperkt. Dit heeft waarschijnlijk te maken met de nog jonge markt waar het opbouwen van specifieke kennis en ervaring een concurrentievoordeel verschaft.

De hier gepresenteerde informatie is vooral ontleend aan de publicaties die in het kader van het USEPA SITE (Superfund Innovatieve Technology Evaluation) programma zijn uitgebracht. Ofschoon deze informatie niet zonder meer op de Nederlandse situatie van toepassing is, kan het wel de aanzet tot een denken over de technologie in ons land vormen. We hopen dat dit rapport zijn weg zal vinden in de Nederlandse onderzoeksprogramma's alsmede in het Nederlandse bedrijfsleven.

augustus 1997

INHOUD

		SAMENVATTING	vi
		SUMMARY	viii
Hoofdstuk	1	INLEIDING	1
Hoofdstuk	2	WAT IS FRACTURING	3
	2.1	Werking en doel van fracturing	3
	2.2	Pneumatic fracturing	3
	2.3	Hydraulic fracturing	4
	2.4	Hydraulic versus pneumatic fracturing	6
Hoofdstuk	3	BEÏNVLOEDING EN CONTROLE VAN DE SCHEUREN	7
	3.1	Inleiding	7
	3.2	Invloedsfactoren	7
	3.3	Controle en beheersing van de fracture richting	8
	3.4	Voorspelling en controle van het fracturing effect	10
Hoofdstuk	4	MOGELIJKHEDEN VOOR HYDROFRACTURE IN NEDERLAND	13
	4.1	Toepasbaarheid	13
	4.1.1	Verwijderingsmechanisme	13
	4.1.2	Technieken	13
	4.1.3	Componenten	13
	4.1.4	Bodemtypen	13
	4.1.5	Omvang van het terrein	13
	4.1.6	Diepte van de verontreiniging	14
	4.2	Randvoorwaarden	14
	4.2.1	Grootte van het invloedsgebied van een conventionele techniek	14
	4.2.2	Geotechnische randvoorwaarden	14
	4.2.3	Consolidatiegraad	14
	4.2.4	Beperkingen ten aanzien van gebouwen, kabels en leidingen	14
	4.3	Eisen ten aanzien van de te behalen resultaten	14
	4.3.1	Saneringsalternatieven	14
	4.3.2	Proefboring	15
	4.4	Afweging tussen kosten en rendement	15
Hoofdstuk	5	MARKTINFORMATIE	17
	5.1	Programma's en websites	17
	5.2	Hydrofracture in Nederland	17
	5.3	Buitenlandse leveranciers van PF- en HF-technologie	17
Hoofdstuk	6	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	21
		LITERATUUR	23

- Bijlage A TOEPASSINGSGEBIEDEN VOOR HYDROFRACTURE IN NEDERLAND**
- Bijlage B RESULTATEN VAN ENKELE EPA-PROJECTEN**

SAMENVATTING

Mogelijke toepassing van hydraulische fracturing bij in situ saneringen

Dit rapport beschrijft de resultaten van een oriënterend literatuuronderzoek naar de toepassingsmogelijkheden van hydrofracturing in Nederland. Het doel van dit rapport is informatie te verschaffen op basis waarvan de zin van vervolgonderzoek, alsmede de noodzaak van praktijkonderzoek, beter kan worden onderbouwd. Het project is uitgevoerd in opdracht van NOBIS en had een totale omvang van twee weken.

Hydrofracturing is het onder hoge druk injecteren van een suspensie in de ondergrond waarbij één of meer doorlatende lagen worden gecreëerd. Hierdoor worden in situ drains gevormd die de grond doorlatender maken en de diffusielengte van stoffen in de ondoorlatende bodem verkleinen. Hydrofracturing kan zowel worden gebruikt om stoffen in de bodem in te brengen als om stoffen aan de bodem te onttrekken.

Naast pneumafracturing, dat werkt volgens hetzelfde principe maar met lucht in plaats van een suspensie, is hydrofracturing al ruim 50 jaar in de petroleumindustrie in gebruik. Publicaties van hydrofracturing voor de reiniging van bodems daarentegen zijn pas na 1985 uitgekomen. Ervaring met de techniek komt nu voor een groter publiek ter beschikking via het USEPA SITE (Superfund Innovative Technology Evaluation) programma.

Uit proefprojecten, die na 1990 via het SITE-programma zijn uitgevoerd, is gebleken dat hydrofracturing vooral een zeer positief effect kan hebben op de onttrekkingsnelheid van vluchtige verontreinigingen bij vacuümextractie- en luchtstripstechnieken. De gunstige resultaten van de demonstraties geven een positief signaal voor verdere ontwikkeling. Er zijn momenteel een aantal bedrijven die toepassingen van hydrofracturing in combinatie met een in situ saneringstechniek aanbieden.

Het SITE-programma is geconcentreerd op het evalueren van reinigingsresultaten en niet op de theorie. Over het ontwerp en de theoretische aspecten van hydrofracturing is wel nagedacht, maar nog weinig gepubliceerd. Vanuit de toepassing van hydrofracturing kan worden afgeleid dat een "fracture" (scheur) bij voorkeur horizontaal loopt, zich symmetrisch uitbreidt en voldoende dik en lang is. In het onderhavige rapport zijn algemene tendensen ten aanzien van deze vier factoren toegelicht.

In dit rapport zijn vier methoden beschreven om het verloop van de fractures te bepalen, namelijk:

1. het volgen van het drukverloop van de geïnjecteerde suspensie;
2. de meting van de stijging van het maaiveld;
3. de meting van de hellingsverandering van het maaiveld;
4. de meting van de elektrische geleiding.

De bepaling van het verloop van de fractures is belangrijk, omdat verticale fractures schade kunnen aanrichten en het verloop van de fractures invloed heeft op het reinigingsresultaat.

Als toepassingsgebied wordt aangegeven kleigrond, klei/veengrond en fijn zand met klei/leeminschakelingen. Deze toepasbaarheid is vooral ingegeven door de geringe doorlatendheid van

deze gronden, ofwel door de mogelijke verbetering in de doorlatendheid via het aanbrengen van fractures. Voor de hydrofracture techniek op zich is niet zozeer de grondsoort van belang als wel de consolidatiegraad hiervan: fractures in normaal geconsolideerde gronden vertonen de (ongewenste) neiging verticaal te lopen, terwijl in overgeconsolideerde gronden de fractures een horizontale voorkeursrichting hebben.

In het rapport is een aantal informatiebronnen vermeld. Het is te verwachten dat in de komende jaren via deze bronnen meer informatie beschikbaar zal komen.

SUMMARY

Possible applications of hydraulic fracturing for in situ remediations

This report contains the results of an initial literature study towards the applicability of hydrofracture in the Netherlands. Aim of the report is to provide a better basis to conduct further study into this area and to support the need for demonstration projects in the Netherlands. This two week project was conducted within the framework of NOBIS.

Hydrofracture consists of high pressure injection of a suspension in the subsoil in order to form one or more permeable layers. These layers form in situ drains that make the subsoil more permeable and allow the contaminants to shorten their diffusion path. Hydrofracture can be used both to introduce components in the soil and to extract components from the soil.

Besides pneumafracture, that works similarly, but uses air instead of a suspension, hydrofracture has been used for over 50 years in the petroleum industry. Publications on hydrofracture for cleaning of soils, on the contrary, are becoming available only after 1985. Experience in using this technique has now become available to a larger audience through the USEPA SITE (Superfund Innovative Technology Evaluation) program.

Demonstration projects that were conducted after 1990 in the SITE program show that hydrofracture can have a very positive influence on the extent of extraction of volatile components using techniques such as vacuum extraction and air stripping. These positive results of the demonstrations form a positive incentive for further development. Presently, a number of companies are offering applications of hydrofracture in combination with an in situ remediation technique.

The site program concentrates on cleaning results rather than on theory. The design and the theoretical aspects of hydrofracture have been given some thought, but little is published. From the mechanism of hydrofracture we may infer that a fracture should, preferably, run horizontal, expands symmetrically, and be sufficiently thick and long. In this report, general tendencies for these aspects are explained.

This report describes four methods to follow the progress of the fractures, namely:

1. monitoring the pressure behavior of the injected suspension;
2. measuring the ground surface heave;
3. measuring the inclination of the ground surface;
4. measuring the electrical conductivity of the subsoil.

Measuring progress is important because vertical fractures may cause damage and the progress of the fractures influences the cleaning results.

Areas of applicability are given as clay, clay/peat and fine sands intertwined with layers of clay. This applicability originates primarily from the limited permeability of these soils, i.e. the possibility of improving permeability by hydrofracture. For the hydrofracture technique, as such, it is not so much the soil type as is the degree of consolidation that is important: fractures in normally consolidated soils show an (undesired) tendency to incline vertically, whereas in over-consolidated soils, the fractures prefer the horizontal direction.

This report gathers a number of information sources. It is to be expected that these sources will provide continuing information during the years to come.

HOOFDSTUK 1

INLEIDING

Een groot deel van de verontreinigde Nederlandse bodems is ongeschikt voor toepassing van in situ bodemreinigingstechnologie. Naast heterogeniteit is met name de ondoorlatendheid van veel Nederlandse bodems een probleem. In ondoorlatende bodems duurt een onttrekking/infiltratie niet alleen lang, maar is ook het invloedsgebied klein. Hierdoor is een groot aantal onttrekkings- en infiltratiebronnen nodig.

Omdat in situ technologie steunt op de eigenschap van de bodem als poreus transportsysteem, is er behoefte aan technieken die deze eigenschap kunnen verbeteren. Een techniek die zich hierop richt is hydrofracture. Deze techniek behelst het inbrengen van één of meer doorlatende lagen in de bodem, waardoor de doorlatendheid toeneemt.

De hydrofracture techniek is momenteel in de USA in opkomst, maar heeft zijn weg naar Nederland nog niet gevonden. Met de informatie in dit rapport zal de zin van nadere studie, alsmede de noodzaak van praktijkonderzoek met betrekking tot deze techniek, beter kunnen worden onderbouwd. De onderhavige studie is uitgevoerd in opdracht van NOBIS en had een totale omvang van twee weken.

De opbouw van het rapport is als volgt. In hoofdstuk 2 wordt ingegaan op het principe van fracturing en worden de twee voornaamste categorieën fracture technieken geïntroduceerd, te weten pneumatic fracturing en hydraulic fracturing. Dit rapport concentreert zich dan verder op de hydrofracture techniek, echter niet zonder op te merken dat pneumatic fracturing een studie op zich waard is.

In hoofdstuk 3 wordt gesproken over de invloedsfactoren met betrekking tot de fracture vorming, het volgen van de fractures en de uiteindelijke invloed op het reinigingsresultaat. Vervolgens wordt in hoofdstuk 4 ingegaan op de toepasbaarheid van de techniek. Hoofdstuk 5 geeft een aantal informatiebronnen en een lijst van aanbieders op het gebied van hydrofracture. In hoofdstuk 6 is een aantal conclusies en aanbevelingen gegeven op basis van het onderzoek. Tot slot wordt een overzicht van de beschikbare literatuur gegeven.

HOOFDSTUK 2

WAT IS FRACTURING

2.1 Werking en doel van fracturing

Fracturing is een techniek waarbij door het onder hoge druk injecteren van een vloeistof of gas de bodem doorlatender wordt gemaakt. Wanneer de druk van dit in de grond geperste medium de aanwezige in situ spanning overschrijdt, breiden bestaande fractures zich uit en beginnen nieuwe fractures te ontstaan [Anonymus, 1994a]. In de olie-industrie wordt fracturing al heel lang gebruikt om de oliewinning (opbrengst van de bronnen) te verbeteren. Een eerste volledige beschrijving van de methode van hydraulische fracturing werd gepubliceerd door Clark in 1949 [Murdoch, 1987].

Door de fracturing ontstaat een netwerk van ondergrondse horizontale drains. De ondergrondse scheuren maken de sanering effectiever en economischer doordat de diffusielengte van en naar de verontreinigingen wordt verkort. Via dit netwerk kunnen stoffen aan de bodem worden onttrokken of juist in de bodem worden ingebracht. Behalve de belofte om in situ saneringen sneller en completer te laten verlopen, biedt fracturing ook de mogelijkheid om het toepassingsgebied van in situ technieken uit te breiden naar minder doorlatende gronden.

Afhankelijk van het medium (lucht of water) dat in de grond wordt geforceerd, wordt respectievelijk gesproken van pneumatische fracturing (PF) of hydraulische fracturing (HF). Kortweg wordt ook wel gesproken van pneumatische fracturing, respectievelijk van hydrofracturing. Na de beschrijving van beide technieken in dit hoofdstuk, wordt in de volgende hoofdstukken nader ingegaan op de hydrofracturing techniek.

2.2 Pneumatische fracturing

Over pneumatische fracturing is vooral door de firma Accutech Remediation Systems (ARS) in het kader van het EPA SITE-programma gepubliceerd [Hasbach, 1993; Anonymus, 1994a; Frank, 1994; Frank en Barkley, 1995]. ARS gebruikt een combinatie van pneumatische fracturing en vacuümextractie om vluchtige organische componenten aan de grond te onttrekken.

Volgens de beschrijving van Frank (1994) wordt in eerste instantie een aantal bronnen met een diameter van 7,6 tot 9,0 cm in de ondergrond aangebracht, bijvoorbeeld met behulp van een avegaar. In het boorgat wordt vervolgens een luchtinjector (een dunne lans met een zijwaartse nozzle) ingebracht. De luchtinjector wordt op de gewenste hoogte in het boorgat gebracht, waarna het boorgat boven en onder de injector luchtdicht wordt afgesloten met opblaasbare rubberafdichtingen (packers); zie figuur 1.

Vervolgens wordt lucht onder een druk van zo'n 35 bar, gedurende 10 tot 20 seconden, in de bodem geforceerd. Hierbij ontstaan de scheuren in de ondergrond. Het proces wordt in secties van 0,7 m tot de gewenste diepte herhaald. Nadat de fractures zijn gevormd, wordt de bron op een vacuümpomp aangesloten, waarna de vluchtige componenten kunnen worden afgezogen. Eventueel niet gebruikte boorgaten kunnen worden afgedicht of dienst doen als (passieve) luchtinlaten [Frank en Barkley, 1995; Valenti, 1995].

Een alternatieve manier van luchttoediening wordt beschreven door Valenti (1995). Deze beschrijft een methode waarbij een luchtinjectiebuis (lans) wordt gesondeerd in plaats van inge-

bracht in een geboorde bron. Een voordeel hiervan is dat het materieel dat voor de sondering wordt ingezet tegelijkertijd ook de luchtinjectie verzorgt. Een nadeel is dat voor de bodemluchtonttrekking na het aanbrengen van de fractures nog eens putten moeten worden geboord, terwijl bij de boormethode het gewenste aantal onttrekkingspunten in één keer kan worden gemaakt.

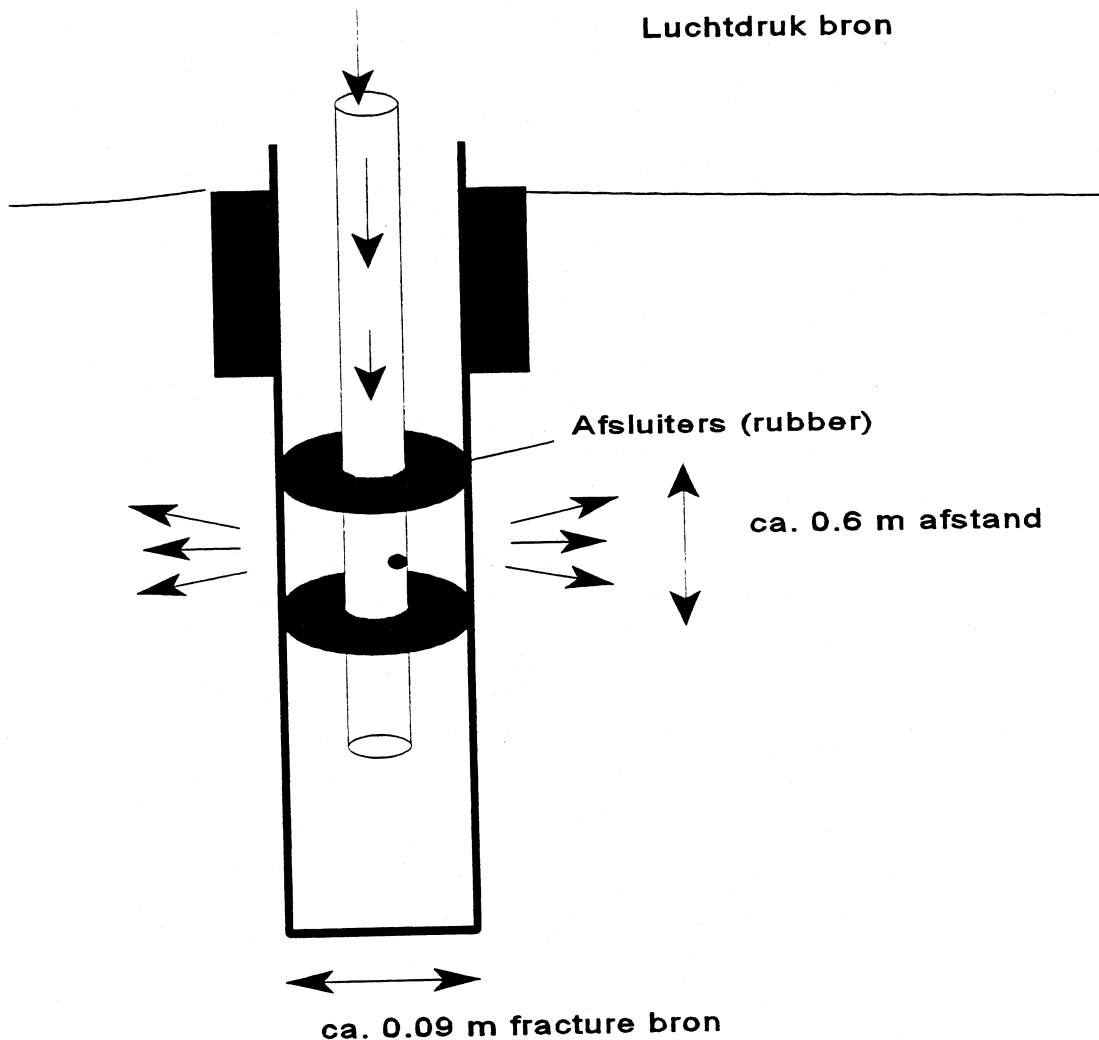


Fig. 1. Principe van pneumatic fracturing.

Het basismaterieel voor pneumafracture bestaat uit compressoren en blowers, cilinders voor opslag van gecomprimeerde lucht en, afhankelijk van de techniek, een speciale injectielans voorzien van opblaasbare afdichtingsringen, of een sonderingsbuis met luchtinjectie. Daarnaast is er standaard grondwerkapparatuur nodig. Het gebruik van standaard, makkelijk verkrijgbare apparatuur maakt dat de techniek snel kan worden gemobiliseerd en geïmplementeerd [Frank, 1994].

2.3 Hydraulische fracturing

Hydraulische fracturing is met name ontwikkeld door Murdoch en anderen [Frank en Barkley, 1995; Murdoch et al., 1991]. Informatie over deze techniek is in het bijzonder beschikbaar gekomen door publicaties over het project Oak Brook, Illinois (zie voorbeeld site 9 in bijlage B).

Hydraulic fracturing bestaat uit twee stappen. Stap 1 is het aanbrengen van één of meer fracture aanzet(ten), terwijl stap 2 het maken van de fracture zelf is (zie fig. 2).

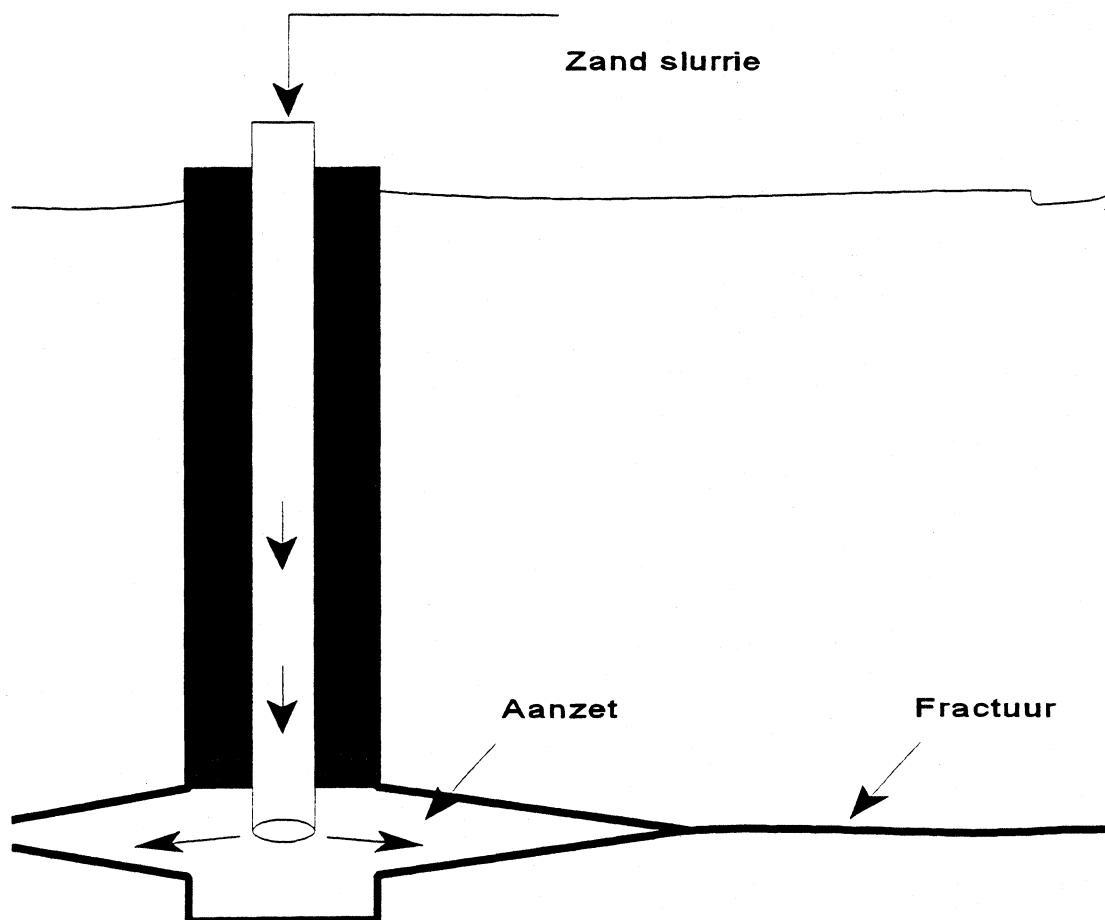


Fig. 2. Principe van hydraulic fracturing.

Stap 1

Een aanzet is een inkeping in het horizontale vlak met een straal van zo'n 10 tot 20 cm, meestal bij de bodem van het boorgat. De aanzet wordt gemaakt door via de casing van het boorgat een lans naar beneden te brengen, die aan het uiteinde is voorzien van een (roterende) hogedrukwaterfrees (24 MPa) [Frank en Barkley, 1995]. De inkeping forceert het begin van een horizontale scheur. Uit ervaring is gebleken dat als er geen aanzet is, de scheuren zich langs de casing, waar het bodemprofiel enigszins verstoord is, omhoog kunnen bewegen.

Stap 2

Een fracture wordt gevormd door via de aanzet een vloeistof onder druk te injecteren. Om de holte van de scheur na het wegnemen van de druk open te houden, kan aan het water een gelvormer en zand worden toegevoegd. Een enzym zorgt ervoor dat na het aanbrengen van de fracture het gel wordt afgebroken, waardoor een doorlatend zandkanaal achterblijft [Frank en Barkley, 1995]. In plaats van zand kan ook een ander granulair materiaal, zoals grafiet, worden gebruikt om scheuren met andere eigenschappen te creëren [Anonymus, 1995a]. Tevens kan het fracture medium chemicaliën bevatten die een in situ chemische reiniging van de bodem bewerkstelligen [Frank en Barkley, 1995].

Het benodigde materieel voor hydrofracture bestaat uit de boor/sondeerstelling, een menginstallatie voor zand, water en guar gum, een injectiepomp en de benodigde opslagtanks. De hogedrukspuit moet voorzien zijn van een conus, zodat deze onder in het boorgat iets dieper dan de casing kan worden ingebracht. Daarnaast is er standaard grondwerkapparatuur nodig.

2.4 Hydraulic versus pneumatic fracturing

Hydraulic en pneumatic fracturing zijn vergelijkbare methoden om scheuren in de grond te vormen. Hydrofracture is wat complexer en daardoor wat duurder dan pneumafracture, maar heeft het voordeel dat de drains doorlatende kanalen zijn die ook blijven bestaan na het wegnemen van de druk. Bij een lange saneringsduur is dit vaak een voordeel. Als bij pneumatic fracturing na het wegnemen van de druk een deel van de gevormde scheuren zou inzakken, zou herhaling van het proces gewenst zijn.

In het Bristol-project (zie voorbeeld site 8 in bijlage B), waarbij alleen water werd geïnjecteerd, (zonder zand en guar gum), werd geconcludeerd dat de fractures open bleven gedurende de maand waarin de techniek werd getest [Valenti, 1995]. Dit zou een aanwijzing kunnen zijn dat de fractures niet altijd behoeven te worden opgevuld met een korrelig materiaal. De demonstratie in Bristol werd overigens gesponsord door het Tennessee Superfund Programma en niet door het SITE-programma.

Hydraulic fracturing is zowel voor spoeltechnieken als voor strip- en extractietechnieken geschikt, terwijl pneumafracture meer geschikt is voor luchtstrippen en vacuümextractie. Voor de toepassing bij striptechnieken hebben pneumafractures het voordeel dat na het aanbrengen van de fractures onmiddellijk met het strippen kan worden begonnen, terwijl bij hydrofracture eerst de ingebrachte vloeistof (met afbraakresten van de gel) moet worden verwijderd. Een nadeel van hydrofracture zou kunnen zijn dat, wanneer er vreemd materiaal in de ondergrond is gebracht (een ander materiaal dan zand), dit materiaal na de sanering zou moeten worden verwijderd.

HOOFDSTUK 3

BEÏNVLOEDING EN CONTROLE VAN DE SCHEUREN

3.1 Inleiding

Bij hydrofracture is het wenselijk om de gewenste scheurvorming vooraf in enigerlei mate te kunnen voorspellen en de werkelijke scheurvorming enigszins te kunnen volgen: de toegevoegde waarde van een scheur is immers afhankelijk van de geometrie hiervan.

Voor het voorspellen van de straal en de vorm van de scheuren, de gewenste druk en de richting zijn modellen voorhanden. De theorie en toepassing van hydrofracture zijn goed ontwikkeld [Schuring, et al., 1991]. Gezien het toepassingsgebied zijn de beschikbare modellen echter ontworpen en gevalideerd voor het simuleren van hydrofracture voor oliewinning op grote diepte en in harde gesteenten. Uit een beperkt vergelijkend praktijkonderzoek uitgevoerd door Murdoch (1993) bleek wel dat een aantal van deze modellen redelijk voldoet voor toepassing in de ondiepe bovengrond en in zachte bodems.

Als regel wordt in de literatuur vermeld dat de HF-fractures in de grond een lengte kunnen bereiken van zo'n 6,5 m en een dikte van zo'n 25 mm. Murdoch (1995) noemt zelfs een lengte van 13 m op een diepte van 2 m in overgeconsolideerde siltige klei. Vanuit een zelfde boorgat kan het proces op verschillende diepten worden herhaald, resulterend in een stapeling van zandgevulde scheuren [Anonymus, 1994b]. De verticale afstand tussen de pannenkoekvormige scheuren kan in de praktijk minimaal liggen op zo'n 0,7 m. Hierbij verzorgt elke "pannenkoek" dus minimaal een laag van 0,35 m dik (de helft van 0,7 m) boven en onder de fracture.

3.2 Invloedsfactoren

Idealiter wordt met behulp van hydrofracture een aantal pannenkoekvormige sandwiches gecreëerd op een diepte naar keuze. Belangrijk voor het effect van hydrofracture is dat elke pannenkoek:

- a. horizontaal loopt;
- b. symmetrisch is;
- c. voldoende dik en lang is.

Sub a. *Horizontale richting van de fracture*

In de ondergrond volgt het ingebrachte fracture medium de weg van de minste weerstand. Dit betekent dat in overgeconsolideerde kleien de fractures een horizontale hoofdrichting volgen, terwijl in normaal geconsolideerde gronden de fractures een voorkeur vertonen voor de verticale richting. Theoretisch kan worden afgeleid dat fractures altijd een (lichte) tendens zullen vertonen om zich naar het oppervlak te bewegen [Murdoch, 1995].

Omdat de grond dicht bij het maaiveld is verstoord en dus niet is geconsolideerd, is de horizontale aanzet een sine qua non om een horizontale fracture te maken. Fractures hebben verder de neiging zich van een bovenlast af te bewegen. Door een last op de bovengrond te plaatsen, kunnen fractures dus enigszins worden bijgestuurd. Fractures die zich onder een bovenlast (een gebouw) begeven, vertonen weinig neiging om zich naar de oppervlakte te bewegen.

Sub b. *Symmetrie van de fracture*

De symmetrie van de fracture is moeilijk te sturen, maar kan enigszins worden voorspeld. Murdoch (1995) vond in zijn tests sterk asymmetrische fractures. Als het fracture medium op zijn weg in de ondergrond een gebied tegenkomt met een hogere stijfheid, zal er een neiging ontstaan zich hiervan af te bewegen. Dit gebied zal dan minder door de fracture worden bereikt. Ook in een gebied waar een hogere spanning heerst, als gevolg van een bovenlast, zal de fracture de neiging vertonen van dit gebied weg te buigen [Murdoch, 1995].

De fracture zal in de praktijk vaak een soort amoebevorm aannemen. Wanneer in het extreme geval de fracture wordt gesplitst in verschillende delen, zal een reiniging van de grond weinig effectief kunnen zijn. Inzicht in de opbouw en stijfheidsopbouw van het (bodem)systeem is dus van belang om de symmetrie van de scheuren te kunnen voorspellen.

Sub c. *Dikte en lengte van de fracture*

De geometrie en lengte van de fracture hangt voornamelijk af van de reologische eigenschappen van de schone en/of zandige fracture media. Ook het bezinkgedrag en de distributie van het zand in de fracture wordt sterk door de reologie van de slurry bepaald [Shah, 1993].

Een toename van de stijfheid van het fracture medium zal de lengte/dikteverhouding van de fracture kleiner maken. Een zeer stijf medium (bijvoorbeeld cement grout) heeft de neiging een prop te vormen met een lengte/dikteverhouding van nagenoeg één. Het gebruik van water zonder toevoegingen als fracture medium daarentegen, zal tot een langere en dunnere fracture leiden.

Volgens Jennings (1996) is het belangrijk dat bij elke toepassing van hydrofracture reeds in een vroeg stadium aandacht wordt besteed aan de selectie van het fracture medium. Het medium moet:

1. voorzien in voldoende viscositeit om de zandkorreltjes te suspenderen en tot ver in de fracture te transporteren;
2. afbreken tot een vloeistof met een lage viscositeit die gemakkelijk kan worden verwijderd.

De eerste fractures werden uitgevoerd met een zandconcentratie van 120 tot 720 kg/m³, maar inmiddels zijn concentraties van 1678 tot 1918 kg/m³ niet ongewoon [Shah, 1993]. Frank en Barkely (1995) noemen een zand/gelverhouding op volumebasis van 0,44 tot 0,53.

Aan het fracture ontwerp is vooral door Murdoch en anderen aandacht besteed [Murdoch et al., 1987 - 1995]. Het blijkt dat de beïnvloedingsmogelijkheid voor de individuele hydrofractures beperkt is. In feite zijn de stijfheid van het fracture medium, en in mindere mate de druk, de belangrijkste ontwerpparameters. Wel kan natuurlijk de fracture configuratie (de onderlinge afstand van de fractures, zowel horizontaal als verticaal) binnen praktische grenzen worden bepaald.

3.3 Controle en beheersing van de fracture richting

In de vorige paragraaf zijn de factoren genoemd die van invloed zijn op de fracture vorm en fracture richting. Dit zijn: de consolidatiegraad van de grond (bepaalt de hoofdrichting van de fracture), de bovenbelasting en stijfheidsverdeling in de grond (buigt de fracture af) en de stijfheid van het fracture medium (bepaalt de fracture lengte/dikteverhouding). Deze factoren zijn tijdens het proces beperkt te beheersen. Het fracturing proces moet daarom nauwkeurig worden gevolgd.

Behalve het volgen van de algemene voortgang van het fracturing proces, is het vooral belangrijk om vlakdoorsnijdingen in verticale richting te signaleren en te voorkomen. De vorming van scheuren in neerwaartse verticale richting is meestal ongewenst, omdat:

- a. het schade kan veroorzaken aan rioleringen, funderingen, kabels en leidingen;
- b. het tot kortsluitstroming naar een lager gelegen watervoerend pakket kan leiden;
- c. verticale fractures weinig bijdragen aan het saneringsrendement.

Problemen, zoals het omhoog of omlaag kruipen van de fractures, kunnen zoveel mogelijk worden beperkt door vooraf goed onderzoek te doen. Veelal is het wenselijk om vooraf op een niet-verontreinigd deel van de locatie een proef uit te voeren, waarbij het richtingverloop van de scheuren visueel wordt onderzocht. Door aan de injectievloeistof een kleurstof toe te voegen die de waarneming vergemakkelijkt, kan door middel van het graven van proefsleuven snel worden gezien welke voorkeursrichting de fractures hebben. Als deze richting niet bevredigend is, kan worden besloten het fracturing proces aan te passen of de fracturing op het betreffende (deel)terrein achterwege te laten.

Voor het bewaken van het verloop van de scheuren tijdens het uitvoeren van hydrofracture op de locatie zijn vier methoden beschikbaar, elk met hun voor- en nadelen. Deze methoden laten het bodemprofiel ongestoord. Door bewaking van het verloop van de vorming van scheuren is het mogelijk het proces bij te sturen (bijvoorbeeld stopzetten). De vier methoden zijn hieronder kort weergegeven [Murdoch, 1995].

1. Volgen van het verloop van de druk van de geïnjecteerde vloeistof/lucht

Tijdens de vorming van een scheur zijn vier fasen in het drukverloop te onderscheiden. Deze geven een indruk van het begin en eind van de fracture vorming. De vier fasen zijn:

- a. een fase van drukopbouw gevolgd door drukverlies (begin van de scheur);
- b. toename van de druk (spanning wordt opgebouwd);
- c. geleidelijke afname van de druk (scheur groeit);
- d. snelle afname van de druk (einde).

Vaak is er na het beëindigen van het pompen als gevolg van deflatie van de gevormde scheuren een vijfde fase waarneembaar. Hierbij vloeit de steunvloeistof terug naar de bron.

2. Meting van de stijging van het maaiveld

Precieze meting van de elevatie van de grond voor en na fracturing geeft een basis voor de dikte en de laterale locatie van de fracture. Als gevolg van deflatie zal bij vorming van een scheur van bijvoorbeeld 20 mm dikte de stijging aan het maaiveld minder bedragen: in orde van grootte van 10 tot 15 mm. Aan de hand van meting vooraf en achteraf op een net van uitgezette meetpunten is de vorm van de scheur te controleren. Als steunvloeistof wordt geïnjecteerd, geeft de verbruikte hoeveelheid in combinatie met het gemeten oppervlak een indicatie van de dikte van de fracture.

3. Meting van de helling(sverandering) van het maaiveld

Hierbij wordt de helling(sverandering) van bakens op het terrein gemeten met behulp van hellingmeters. Tijdens proeven zijn uitslagen gemeten in de orde van grootte van 2.000 micro-radiaal. Hellingmeters zijn ideaal, omdat de gegevens hieruit snel kunnen worden gelezen en opgeslagen in een computer [Hocking, 1996].

4. Meting van de elektrische geleiding

Hierbij wordt een spanningsverschil aangelegd tussen het injectiepunt en een punt vele tientallen meters verwijderd (benadering van op oneindig gerichte evenwijdige veldlijnen). Vooraf is aan de injectievloeistof een elektrolyt, zoals KCl, toegevoegd, waardoor zich in de scheur naar verhouding een grote hoeveelheid elektrolyt bevindt. Hierdoor is op plaatsen van de scheur vrijwel geen verval in potentiaal. Aan de hand van de isopotentialijnen is interpretatie mogelijk van zowel de vorm als de positie van de scheur.

De potentiaalmethodede heeft in proefnemingen een redelijk resultaat opgeleverd. Interpretatie van de meetgegevens vergt echter veel oefening, omdat deze met het isopotentialverloop in de ongestoorde bodem moet worden vergeleken. Interpretatie van de meetgegevens kan nog verder worden bemoeilijkt door de invloed van in de bodem aanwezige geleidende voorwerpen, zoals leidingen en kabels.

3.4 Voorspelling en controle van het fracturing effect

Theoretisch is het effect van hydrofracture afhankelijk van de mechanica van het fracture proces (de mogelijkheid tot het maken van een optimale fracture) en het transport van de verontreinigingen door het niet-gescheurde en het gescheurde deel van de ondergrond [Schuring et al., 1991]. Het succes van de hydrofracture zou kunnen worden voorspeld als men beschikt over een indruk van het terrein na het scheuren (eventueel op basis van een proef fracturing), een indruk van het verwijderingsmechanisme (eventueel op basis van laboratoriumexperimenten of een proefonttrekking) en een transportmodel.

Teneinde de verwijderingssnelheid te kunnen berekenen, zijn evenals bij conventionele ont-trekkingsystemen onder meer de volgende parameters nodig:

1. Stofgegevens

- concentratie en totale massa aan verontreinigingen;
- vluchtigheid van de componenten;
- diffusieparameters;
- afbraakparameters.

2. Bodemtransportparameters

- doorlatendheid van de bodem;
- adsorptie/desorptieconstanten (en organische stofgehalten, e.d.);
- opbouw van de bodem en de positie van het grondwater;
- verontreinigingssituatie (verdeling van de verontreiniging; vrij product).

3. Eigenschappen van de fractures

- doorlatendheid van het fracture medium;
- vorm, lengte en dikte van de fractures;
- ruimtelijke spreiding en dichtheid van de fractures (verticaal en horizontaal).

Een belangrijk resultaat van modelberekeningen bij toepassing van vacuümextractiesystemen is de invloedssfeer van de fractures (zowel horizontaal als verticaal) als functie van de onderdruk in de bron. Door middel van een analyse van afwijkende configuraties en parameters kan de gevoeligheid voor configuratie-afwijkingen en/of parameters in kaart worden gebracht.

Op basis van afwijkingen in de fracture configuratie ten opzichte van het ontwerp kan vervolgens de gevoeligheid worden geëvalueerd. Immers, door middel van een eerste berekening is de configuratie van de fractures (lengte, dikte en onderlinge afstand) bepaald die voldoende

zou moeten zijn om de sanering uit te voeren en/of de sanering in voldoende mate te kunnen versnellen.

Criteria, die bij de vergelijking zouden kunnen worden gebruikt, zijn de lengte en dikte van de fractures, de mate van afwijking van het horizontale vlak en de symmetrie. Een analyse op basis van uitsluitend modellen is in de literatuur niet gevonden; blijkbaar liggen deze modellen momenteel nog niet op de plank.

In de literatuur wordt het effect van de fracturing op de verwijdering van vluchtige componenten gekwantificeerd op basis van de massavracht componenten dat na fracturing, ceteris parabis, per tijdseenheid aan de ondergrond wordt onttrokken. Zie hiervoor het voorbeeld in het kader. Veelal wordt de vergelijking gemaakt door in dezelfde bron vóór het scheuren enige tijd massa te onttrekken. Hierbij wordt soms een halfwaardeconstante bepaald (de concentratie aan verontreinigingen in de gasstroom vertoont veelal een exponentieel aflopend verloop).

Ofschoon het op zich interessant is te zien dat door het scheuren de verwijderingsnelheid soms orden van grootte toeneemt, is deze toename niet goed te interpreteren zonder een conceptueel model van het verwijderingsmechanisme. In de praktijk wordt daarom volstaan met het vermelden van het succes van de techniek, i.e. de toename in de onttrekkingssnelheid.

Doordat de verwijderingsnelheid een omgekeerd verband heeft met de tijdsduur van de sanering, kan ervoor worden gekozen het saneringsresultaat te evalueren op basis van de tijd die nodig is om de gehele sanering (tot een bepaalde eindconcentratie of tot een bepaald verwijderingspercentage) uit te voeren. Als een eindconcentratie in de grond als beoordelingscriterium wordt genomen, zal bij het nemen van monsters er rekening mee moeten worden gehouden dat de verticale distributie van de verontreinigingen ter plaatse van de scheuren afwijkt van die in het onverstoorde deel van de site.

Uit de literatuur blijkt dat bij gelijkblijvende omstandigheden direct na de hydrofracturing de luchtstroom toeneemt, maar dat de concentratie van de verontreinigingen in de luchtstroom kan toe- of afnemen (zie hiervoor de voorbeeld sites in bijlage B). Een toename van de concentratie zou kunnen betekenen dat de onttrekking in de onverstoorde bron reeds vanaf het begin

Praktijkvoorbeeld, Xerox site, Oak Brook Illinois
[Frank en Barkley, 1995]

Van juli 1992 tot begin 1993 evalueerde men de effectiviteit van hydraulische fracturing voor bodemluchtextractie. De verontreiniging in de bodem bestond uit vluchtige chloorkoolwaterstoffen (TCE) in gehalten tot 150 mg/kg droge stof tot een diepte van 6 meter beneden maaiveld. De bodem was een 12 m dikke kleihoudende glaciële afzetting, hier en daar onderbroken door zandlenzen met een doorlatendheid van $4 \cdot 10^{-6}$ tot $7 \cdot 10^{-7}$ cm/s. Het grondwater bevond zich zo'n 9 meter beneden maaiveld.

Voor een effectief bodemluchtonttrekkingssysteem zouden in dit geval zo'n 300 onttrekkingsbronnen en een groot aantal ventilatieputten nodig zijn geweest. Zonder hydrofracture zou een dergelijke site op een andere manier gesaneerd worden.

Als proef werden vanuit 2 boorgaten 6 scheuren gemaakt op diepten van respectievelijk circa 1,8; 3,0 en 4,6 m beneden maaiveld. De opbrengst van deze bronnen werd vergeleken met die van een niet behandelde bron. De resultaten waren veelbelovend: het onttrekkingsdebiet in de met hydrofracture behandelde bronnen bedroeg 400 - 970 l/min tegen 31 l/min (een toename met een factor 13 tot 31) voor de onbehandelde bron. De concentraties aan TCE in de onttrekkingslucht was een factor 2 lager dan in de onbehandelde bron. Het massatransport was 7 - 14 keer groter in de onbehandelde bronnen. De afname van het massatransport vertoonde een exponentieel verloop. Hierbij was de halfwaardeconstante voor de conventionele bron zo'n 70 % kleiner dan die voor de gefractureerde bron.

Men constateerde dat in de conventionele bron vrijwel geen onderdruk meer aanwezig was op een afstand van één meter van de bron. In de gefractureerde bron daarentegen werd op een afstand van 7,6 meter nog onderdruk gemeten.

diffusie gecontroleerd is geweest en dat de fracture nieuwe (en verse) verontreinigde plekken heeft aangeraakt. Tevens is het mogelijk dat de fractures pockets van pure verontreiniging hebben opengeboken. Een afname van de concentratie betekent waarschijnlijk dat de verontreinigingen door de grotere luchtstroom zijn verdund.

Over het geheel genomen wordt meestal een dramatische toename van de onttrekkingsvracht (de concentratie aan verontreinigingen in de luchtstroom maal het debiet van de luchtstroom) gemeld. Het effect van fracturing op de doorlatendheid zou in principe een ontwerpparameter kunnen zijn. De relatie tussen deze "effectieve" doorlatendheid en het verwijderingsvermogen is echter sterk configuratie-afhankelijk.

MOGELIJKHEDEN VOOR HYDROFRACTURE IN NEDERLAND

4.1 Toepasbaarheid

4.1.1 *Verwijderingsmechanisme*

Hydraulic fracturing resulteert in een netwerk van (zandgevulde) drains die ervoor zorgen dat de diffusielengte van en naar de verontreiniging sterk wordt verkort. Deze miniatuur drains verbeteren de transporteigenschappen voor de verontreiniging en andere stoffen in de ondergrond. Tevens worden hierbij verontreinigingsgebiedjes ontsloten. De techniek is daarmee toepasbaar op alle stoffen die fysisch beschikbaar zijn voor de bodemlucht of bodemvloeistof. Uitgezonderd zijn stoffen die irreversibel zijn gebonden in de grond en stoffen die niet (bio)-beschikbaar zijn.

4.1.2 *Technieken*

Technieken die van de hydrofractures profiteren zijn alle in situ technieken die hun werking uitoefenen op basis van mediatransport in de ondergrond. Dit houdt in dat de prestatie van elke conventionele in situ techniek zou kunnen worden verbeterd met hydrofracture. Met name wordt hierbij gedacht aan bodemluchtextractie, stoomstrippen, luchtstrippen en vloeistofextractie, en in situ biologische sanering. In ontwikkeling is verder de combinatie van horizontaal (gericht) boren in combinatie met fracturing [Nichols, 1992]. Ook wordt de hydrofracture techniek verder ontwikkeld voor in situ sanering van terreinen met een hogere doorlatendheid en/of een gelaagde opbouw [Smith en Hannah, 1996].

4.1.3 *Componenten*

Hydrofracture kan worden toegepast voor stoffen die ofwel vluchtig zijn, ofwel biologisch of chemisch afbreekbaar zijn. Praktijkvoorbeelden zijn vooral gericht geweest op vluchtige gechlloreerde componenten, BTEX en olie. Het verwijderen van vluchtige gechlloreerde verbindingen is momenteel nog de belangrijkste toepassing. Onderzoek is gaande naar de chemische afbraak van gechlloreerde componenten in de bodem. Hierbij wordt aan het fracture medium een chemische stof toegevoegd die bepaalde componenten in de grond kan afbreken. Een voorbeeld is de chemische afbraak van gechlloreerde oplosmiddelen met behulp van poederijzer [Valenti, 1995].

4.1.4 *Bodemtypen*

Het toepassingsgebied van hydraulische en pneumatische fracturing bestrijkt in principe het gebied van geconsolideerde tot overgeconsolideerde kleigronden tot zandige gronden met lenzen van klei of veen. Er wordt vermoed dat PF en HF geschikt zijn voor bijna elke site waar zich kleiige of dichte gronden bevinden die verontreinigingen hebben opgenomen [Valenti, 1995]. Volgens Nichols (1992) werkt hydrofracture het best in sterk verdichte gronden met een lage permeabiliteit. Een overzicht van mogelijke toepassingsgebieden naar bodemtype in Nederland is opgenomen in bijlage A (zie fig. A1 en A2).

4.1.5 *Omvang van het terrein*

Hydrofracture is niet gebonden aan een grootte van het terrein. In feite worden cellen gecreëerd met een diameter van zo'n 6 meter die onafhankelijk van elkaar op het terrein kunnen worden aangebracht. Uit resultaten van tests blijkt dat de invloedssfeer nog wat kan worden vergroot door aan de rand van de invloedssfeer een aantal passieve inlaten te plaatsen.

4.1.6 *Diepte van de verontreiniging*

Hydrofracture is niet gebonden aan een bepaalde diepte. Wel is het zo dat naarmate er meer horizontaal gerichte fractures verticaal boven elkaar worden aangebracht, de stijging van het maaiveld groter zal zijn. Hydrofractures kunnen zowel boven als onder de grondwaterspiegel worden aangebracht.

4.2 **Randvoorwaarden**

4.2.1 *Grootte van het invloedsgebied van een conventionele techniek*

Het aanbrengen van fractures moet het invloedsgebied van de saneringstechniek zodanig verbeteren dat met een beperkt aantal bronnen en binnen een beperkte tijd de site kan worden gesaneerd. Veelal ligt de grens van de toepassing van conventionele in situ methoden rond een hydraulische doorlatendheid van 10^{-6} m/dag (watertransport) respectievelijk 10^{-7} m/dag (luchttransport). Naarmate de doorlatendheid kleiner wordt, zal toepassing van hydrofracture aantrekkelijker worden. Een praktische ondergrens van de doorlatendheid voor toepassing van hydrofracture is niet bekend, maar het is voorstelbaar dat de ondergrens van de doorlatendheid wordt bepaald door de haalbare minimale verticale afstand van de fractures.

4.2.2 *Geotechnische randvoorwaarden*

Een vrij grondoppervlak zal ruwweg stijgen in de orde van de dikte van de totaal ingebrachte fractures. Hydrofracture kan worden toegepast als deze stijging toelaatbaar is. Bij het aanbrengen van scheuren onder constructies zal met een additionele grondspanning rekening moeten worden gehouden.

4.2.3 *Consolidatiegraad*

In normaal geconsolideerde gronden zullen fractures de neiging vertonen een verticale oriëntatie aan te nemen. Dit betekent dat het invloedsgebied in dit soort gronden zeer gering is. Ten dele zou dit mogelijk kunnen worden opgevangen door het plaatsen van een bovenlast.

4.2.4 *Beperkingen ten aanzien van gebouwen, kabels en leidingen*

Wanneer fractures verticaal lopen, bestaat de kans op schade aan kabels en leidingen, schade aan rioleringen en op kortsluitstromen naar dieper gelegen watervoerende pakketten. Alleen door goed onderzoek kan deze schade worden voorkomen. Fractures zullen de neiging vertonen zich van gebouwen af te bewegen. Fractures die toch onder gebouwen lopen kunnen additionele spanningen veroorzaken in de fundering.

4.3 **Eisen ten aanzien van de te behalen resultaten**

4.3.1 *Saneringsalternatieven*

Bij het beoordelen van hydrofracture als alternatief zal in eerste instantie worden bepaald of hydrofracture een alternatief is voor één of meer conventionele in situ saneringen, ofwel een alternatief is voor afgraven. Als alternatief voor een conventionele in situ sanering zal vooral de additionele inspanning en eventuele overlast van de scheurvorming moeten opwegen tegen de vermindering van het aantal conventionele boringen en de snellere sanering.

Als alternatief voor afgraven zullen behalve de kosten van de sanering, vooral het eindresultaat en de continuering van het gebruik van de site een rol spelen in de afweging. Bij dit laatste alternatief zijn de kostenmarges ruimer. Voor zover mogelijk zal worden geprobeerd de afwegingen te onderbouwen door het maken van oriënterende berekeningen ten aanzien van de invloed van de fractures op de verwijderingssnelheid.

4.3.2 Proefboring

Zoals is opgemerkt, wordt de haalbaarheid van hydrofracture in de praktijk bepaald door met behulp van een proefboring:

- a. na te gaan in welke mate de fractures kunnen worden aangebracht;
- b. de opbrengst van de bron voor en na het aanbrengen van de scheuren te vergelijken.

Op basis van de resultaten van de proefboring kan de benodigde bronconfiguratie worden bepaald en kan een schatting van de saneringstijd worden gemaakt (al of niet met behulp van een modelberekening). Op basis hiervan zullen de kosten en baten van hydrofracture dan tegen elkaar moeten worden afgewogen.

4.4 Afweging tussen kosten en rendement

De mogelijke toegevoegde waarde van HF of PF is dat:

- in situ technologie als alternatief voor afgraven in beeld komt, of
- een conventionele in situ techniek als alternatief voor een andere conventionele in situ techniek in beeld komt, of
- een reductie in het aantal infiltratie- en/of onttrekkingsbronnen van een conventionele in situ techniek kan worden gerealiseerd, of
- een reductie in saneringstijd en/of een completere sanering kan worden gerealiseerd.

Tegenover deze voordelen staan de kosten van hydrofracture. Gezien het ontwikkelingsstadium waarin de hydrofracture techniek zich bevindt, is het niet verwonderlijk dat er nog weinig over de kosten van de techniek is gepubliceerd. In ieder geval moet rekening worden gehouden met:

- kosten van preparatie van het terrein en mobilisatie van de techniek;
- kosten van de boorwerkzaamheden;
- onderzoekskosten (vooronderzoek met behulp van een proeffracture);
- verkrijgen van vergunningen;
- kosten van materieel (lease- of investeringskosten van boor- en injectie-apparatuur, voorraad tanks, enz.);
- kosten van menskracht;
- kosten van materialen (lucht, guar gum, enz.);
- voorzieningen (elektra en water);
- emissiebeheersing en verwerking van reststoffen;
- analyses.

De kosten van de hydrofracture operatie zullen verder afhangen van de fracture configuratie (aantal fractures in verticale en horizontale richting), de benodigde tijdsduur per fracture en de operationele kosten inclusief de materiaalkosten. Daarnaast zal rekening moeten worden gehouden met de aansluiting van de conventionele in situ techniek en de operationele kosten hiervan (waaronder afgasreiniging, e.d.).

Ter oriëntering kan worden vermeld dat de leasekosten van een pneumatic fracturing installatie worden geschat op zo'n f 15.000,- per week [USEPA, 1993]. Geschat wordt dat per dag in één tot twee bronnen scheuring kan worden uitgevoerd. Er mag worden verwacht dat hydraulische fracturing iets minder snel gaat en dat de kosten wat hoger zullen zijn.

Voor de afweging van de kosten en baten van hydrofracture kunnen onder bepaalde aannamen wel onderbouwende berekeningen worden gemaakt. Hiervoor is een conceptueel model van het

verwijderingsmechanisme, een indruk van de haalbaarheid van scheurvorming van de site, alsmede een offerte van één van de leveranciers van de technologie nodig.

HOOFDSTUK 5

MARKTINFORMATIE

5.1 Programma's en websites

Informatie over de besproken technologie is te vinden in gecomputeriseerde databanken van de Environmental Protection Agency (EPA). Voorbeelden hiervan zijn het "Vendor Information System for Innovative Treatment Technologies (VISITT)", "Alternative Treatment Technologies Information Center (ATTIC)" en de "Dialog Information Services". Deze databases zijn via het internet te benaderen. In enkele gevallen moet daarbij een toegangscode worden aangevraagd.

Enkele websites met informatie over HF en PF zijn:

- <http://www.terravac.com/TVpapers.html> (PF);
- <http://www.terravac.com/TVtoolspst.html> (PF);
- <http://www.chmr.com/gwrtac/ascii/hpfract.html> (HF).

Artikelen over hydrofracture verschijnen in publicaties van de overheid, zoals de "Hazardous Substance Research Center Annual Reports", de "Superfund Innovative Technology Evaluation Technology Profiles" en de "Department of Energy Office of Technology Development Program Summary". Tevens wordt in de reguliere vakbladen van tijd tot tijd iets over HF en PF gepubliceerd.

5.2 Hydrofracture in Nederland

In Nederland wordt onderzoek gedaan door het Hydraulic fracturing researchteam van de faculteit Aardwetenschappen (mining and petroleum engineering department) van de TU Delft. Contactpersoon hiervoor is dhr. C.J. de Pater.

Uit enkele oriënterende gesprekken met enkele Nederlandse aannemers blijkt dat er nagenoeg geen kennis bestaat van de hydrofracture techniek in Nederland. Wel blijkt in situ jet grouting soms een fracturing effect te hebben. Slechts een klein aantal aannemers begeeft zich op deze markt.

Op zich lijkt de apparatuur voor HF veel op die voor groutinjectie en moet dus te huur of te koop zijn. Gezien de ondiepe toepassing is voor hydrofracture geen zwaar materieel nodig. Bijkomende apparatuur, zoals menginstallaties en pompen, is ruimschoots voorhanden. Deze apparatuur moet voldoende capaciteit bezitten om de fracture vorming te volgen. Bij de pompkeuze moet rekening worden gehouden met slijtage als gevolg van de schurende werking van het zand/watermengsel.

Buitenlandse bedrijven die de HF-technologie op de markt brengen, hebben veelal aanpassingen aan de wijze van injectie aangebracht. Bovendien schijnt het opdoen van ervaring van essentieel belang te zijn bij het goed uitvoeren van de fracturing operatie. Het lijkt daarmee aanbevelenswaardig een eerste proefproject uit te voeren met een bedrijf dat ervaring heeft met de toepassing van de techniek.

5.3 Buitenlandse leveranciers van PF- en HF-technologie

Hydraulic en pneumatic fracturing wordt door diverse leveranciers op de markt gebracht. De leveranciers verschillen door hun kennis van de techniek, de toegepaste luchtinjectie, het

fracturing medium en/of hun ervaring daarmee en de in situ techniek die door hen veelal in combinatie met de fracturing wordt aangeboden.

De techniek die wordt beschreven in 2.2 bijvoorbeeld is ontwikkeld door het Hazardous Substance Management Research Centre (HSMRC) en gepatenteerd onder het service mark Pneumatic Fracturing Extraction (PFE) [Anonymus, 1993]. De installatie bestaat uit een standaard pneumatic fracturing installatie met een (warme) luchtstripeenheid.

Hierna is een (incomplete) lijst gegeven van bedrijven (in willekeurige volgorde) die zich op de markt profileren met een variant van HF of PF.

C & R Environmental Services

Contactpersoon: dhr. Bahram Charkian

tel: (504)769-9345

fax: (504)925-9424

email: fatehmeh@linknet.net

Accutech Remedial Systems, Inc.

Contactpersoon: dhr. John Liskowitz

Cass Street and Highway 35

Keyport, NJ 07735

tel: 908-739-6444

fax: 908-739-0451

Al Simmons Consultants, Inc

Contactpersoon: dhr. Al Simmons

tel: 214-783-0533/305-944-6252

email: alsm@concentric.net

Center for Geo-Environmental Science & Technology

University of Cincinnati

Contactpersoon: dhr. Larry Murdoch

Engineering Research Division, ML 0384

1275 Section Rd.

Cincinnati, OH 45237-2615

tel: 513-556-2472

fax: 513-556-2522

FRX, Inc.

Contactpersoon: dhr. Bill Slack

PO Box 37945

Cincinnati, OH 45222

tel: 513-556-2526

Hazardous Substance Management Research Center

Contactpersoon: dhr. John Schuring, Ph.D. en dhr. Peter Lederman

New Jersey Institute of Technology

138 Warren Street

Newark, NJ 07102

tel: 201-596-5849

National Risk Management Research Laboratory

Contactpersoon: dhr. Uwe Frank
2890 Woodbridge Avenue
Edison, NJ 08837
tel: 908-321-6626
fax: 908-906-6990

Remediation Technologies, Inc.

Contactpersoon: dhr. Don Lundy
23 Old Town Square, Suite 250
Fort Collins, CO 80524
tel: 303-493-3700

Terra Vac, Inc.

Contactpersoon: dhr. James Malot
356 Fortaleza Street
PO Box 1592
San Juan, PR 00902-1592
tel: 809-723-9171

Terra Vac, Inc.

Contactpersoon: dhr. Ed Malmanis
806 Sylvia Street
West Trenton, NJ 08628-3239
tel: 609-530-0003

HOOFDSTUK 6

CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

Hydrofracture is één van de weinige technieken die het fundamentele probleem van de ondoorlatendheid van bodems zou kunnen oplossen. Een alternatief voor fracturing zou directional drilling kunnen zijn.

Uit het onderzoek blijkt dat de informatie met betrekking tot de hydrofracture techniek nog beperkt is. Hierdoor is het niet goed mogelijk de technische en niet-technische aspecten van de techniek volledig in kaart te brengen.

Uit de proefprojecten, die in het kader van het USEPA SITE-programma zijn beschreven, kan worden geconcludeerd dat hydrofracture wat betreft het effect op het onttrekken van vluchtige componenten veelbelovend lijkt. Zowel de doorlatendheid als de opbrengst per bron kan daarbij orden van grootte toenemen.

Om de inzetbaarheid van hydrofracture in de Nederlandse situatie te kunnen evalueren, is het aan te bevelen één of meer proefprojecten uit te voeren. Enerzijds om een beeld te krijgen van de toepasbaarheid van de techniek in de Nederlandse bodems, anderzijds om een beeld te krijgen van de uitvoerbaarheid en de kosten van de techniek.

LITERATUUR

Anonymus, 1993.

Casebook - TCE mass removal rate increased dramatically using pneumatic fracturing and hot gas injection.

Pollution Engineering, 25.8, 1993, pp 53-56.

Anonymus, 1994a.

Pneumatic fracturing, in recent results from the SITE program.

Hazardous Waste Consultant, 12 (1), januari-februari 1994.

Anonymus, 1994b.

Hydraulic fracturing, in recent results from the SITE program.

Hazardous Waste Consultant, 12 (1), januari-februari 1994.

Anonymus, 1995a.

In situ remediation technology status report: Hydraulic and pneumatic fracturing.

U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response, Technology Innovation Office, EPA/542/K-94/005, april 1995.

Frank, U., 1994.

U.S. Environmental Protection Agency's Superfund Innovative Technology Evaluation of Pneumatic Fracturing Extraction.

The Journal of the Air and Waste Management Association, 44, oktober 1994, pp 1219-1223.

Frank, U. en N. Barkley, 1995.

Remediation of low permeability subsurface formations by fracturing enhancement of soil vapor extraction.

Journal of Hazardous Materials, 40 (2), februari 1995, pp 191-201.

Hasbach, A., 1993.

Pneumatic fracturing boosts subsurface cleanup.

Casebook Pollution Engineering, 15 april 1993, p 53.

Hocking, G., 1996.

Soil hydraulic fracturing.

Water Well Journal, 50, juni 1996, pp 70-72.

Jennings Jr, A.R., 1996.

Fracturing fluids - then and now.

Journal of Petroleum Technology, 48.7, 1996, pp 604-611.

Murdoch, L.C., 1987.

Innovative delivery and recovery systems, hydrofracture - phase I.

Interim Report EPA, contractnr. 68-03-3379, Center Hill, oktober 1987.

Murdoch, L.C., 1993.

Hydraulic fracturing of soil during laboratory experiments. Part 1: Methods and observations.

Géotechnique, 43 (2), 1993, p 255-287.

- Murdoch, L.C., 1993b.
Hydraulic fracturing of soil during laboratory experiments. Part 2: Propagation.
Géotechnique, 43 (2), 1993, pp 267-276.
- Murdoch, L.C., 1995.
Forms of hydraulic fractures created during a field test in over consolidated glacial drift.
Quarterly Journal of Engineering Geology, 28, 1995, pp 23-35.
- Murdoch, L.C., M. Kemper en A. Wolf, 1992.
Hydraulic fracturing to improve in situ remediation of contaminated soil.
Annual Meeting of the Geological Society of America, Cincinnati, OH, 24 (7), 26-29 oktober 1992, p A72.
- Murdoch, L., et al., 1988.
Innovative technologies of delivery or recovery: A review of current research and a strategy for maximizing future investigations.
Progress Report, USEPA, contractnr. 68-03-3379, april 1988.
- Murdoch, L.C., et al., 1990.
The feasibility of hydraulically fracturing soil to improve remedial actions.
September 1990.
- Murdoch, L.C., et al., 1991.
Feasibility of hydraulic fracturing of soil to improve remedial actions.
U.S. Environmental Protection Agency, EPA/600/2-92/012, april 1991.
- Murdoch, L.C., et al., 1991.
Feasibility of hydraulic fracturing of soil to improve remedial actions.
EPA Project Summary, augustus 1991.
- Murdoch, L.C., et al., 1993.
Hydraulic and impulse fracturing to enhance remediation.
U.S. Environmental Protection Agency, EPA/600/R-93/040, april 1993.
- Murdoch, L.C., et al., 1995.
Hydraulic fractures as subsurface electrodes: Early work on the lasagna process.
EPA/600/R-95/012, april 1995.
- Nichols, A.B., 1992.
Hydraulic fracturing may enhance in situ remediation.
Water Environment and Technology, december 1992, pp 11-16.
- Schuring, J.R., J.V. Jurka en P.C. Chan, 1991.
Pneumatic fracturing to remove VOC's.
Remediation, winter 1991/1992, pp 51-67.
- Shah, S.N., 1993.
Rheological characterization of hydraulic fracturing slurries.
SPE, Production and Facilities, 8.2, 1993, pp 123-130.

Smith, M.B. en R.R. Hannah, 1996.
High-permeability fracturing: The evolution of a technology.
Journal of Petroleum Technology, 48.7, 1996, pp 628-633.

USEPA, 1993.
Technology evaluation report: Site program demonstration test accutech pneumatic fracturing
extraction and hot gas injection, phase 1.
U.S. Environmental Protection Agency, EPA/540/R-93/509, 1993.

Valenti, M., 1995.
Cracking open waste sites.
Mechanical Engineering, oktober 1995, pp 90-94.

Geraadpleegde literatuur:

Alekseenko, O.P. en A.M. Vaisman, 1996.
Asymmetric growth of hydraulic fracture cracks.
Mechanics of Solids, 31.1, 1996, pp 93-99.

Andersen, K.H., et al., 1994.
Estimation of hydraulic fracture pressure in clay.
Canadian Geotechnical Journal, 31.6, 1994, pp 817-828.

Anonymus, 1992.
Pneumatic fracturing unlocks trapped soil contaminated soil and rock.
Chemical Engineering Progress, oktober 1992.

Anonymus, 1993c.
New technique cracks hard-to-treat soils.
Center point (A Publication of the Hazardous Substance Research Centers), 1 (2), 1993, p 1.

Anonymus, 1994c.
Alternative methods for fluid delivery and recovery.
U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development,
EPA/625/R-94/003, september 1994.

Anonymus, 1994d.
PFE process increases VOC extraction rate.
E & P Environment, 5 (5), maart 1994.

Anonymus, 1995b.
Field lens - Golden associates, fractool system forms high permeability lenses within clays
increasing the application of many geotechnical processes including in situ remediation.
Ground Engineering, 28.6, 1995, pp 16-18.

Anonymus, 1996.
Technology - DOE joins Cal/EPA Technology evaluation program. Innovative technologies for
superfund cleanups.
Environmental Science and Technology - Columbus, 70A, 1996.

- Anonymus, 1996.
Monitoring of tanks gets help from directional boring.
Technology and Equipment, april 1996, pp 40-41.
- Anonymus, 1996.
Directional boring gains ground in water and sewer industry.
Technology and Equipment, juni 1996, pp 64-65.
- Bliss, P., 1996.
Subsurface info is now more accessible.
Technology and Equipment, april 1996, pp 42.
- Blystone, P., 1994.
Recent results from the SITE program.
The Hazardous Waste Consultant, januari-februari 1994, pp 1.1-1.16.
- Cicalese, M.E. en J.P. Mack, 1994.
Application of pneumatic fracturing extraction for removal of VOC contamination in low permeable formations.
I & EC Special Symposium, American Chemical Society, Atlanta, Georgia, 27-29 september 1994.
- Davis-Hoover, et al., 1995.
Hydraulic fractures as anaerobic and aerobic biological treatment zones.
U.S. Environmental Protection Agency, EPA/600/R-95/012, april 1995.
- Du, Y., A. Aydin en L. Murdoch, 1993.
Incremental growth of a shallow hydraulic fracture at a waste remediation site.
Oakbrook, Illinois from inversion of elevation changes, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 30.7, 1993, pp 1273-1280.
- Frank, U., 1992.
Fact sheet: Proposed site demonstration for an industrial site in central New Jersey, October 23, 1992.
- Frank, U., 1993.
Pneumatic fracturing increased VOC extraction rate.
Tech Trends., EPA/542/N-93/010, december 1993.
- Frank, U., et al., 1994.
Site demonstration of pneumatic fracturing and hot gas injection.
U.S. Environmental Protection Agency, EPA/600/R-94/011, maart 1994.
- Gabr, M.A., et al., 1996.
In situ soil flushing using prefabricated vertical drains.
Canadian Geotechnical Journal, 33, 1996, pp 97-105.
- Gierke, J.S., et al., 1995.
In situ mixed region vapor stripping in low-permeability media. 3. Modeling of field.
Environmental Science and Technology - Columbus 29.9, 1995, pp 2208-2216.

- Golder Associates Engineering Services, ongedateerd.
Hydraulic and pneumatic fracturing of soils for enhanced sit remediation.
Bedrijfsbrochure.
- Guo, F., N.R. Morgenstem en J.D. Scott, 1994.
Interpretation and analyses of hydraulic fracture pressures.
Journal of Canadian Petroleum Technology, 33.6, 1994, pp 18-22.
- Haag, Ö., 1996.
Hydrofracturing boosts water yield in dry well to 1,800 l/h.
Water Wells, augustus 1996, pp 20-22.
- Hayward, P., 1996.
Sewer repairs at high speed.
Technology and Equipment, juni 1996, pp 66.
- Hopkins, C., 1996.
Real-Time 3D hydraulic fracture models - by evaluating fracturing techniques in real time and three dimensions, engineers can optimize fractures during the actual treatment, minimizing tests and reducing improperly designed fracturing losses.
Petro Systems World, 05, 1996, pp 12-17.
- Huck, P.J., M.J. Waller en S.L. Shimondle, 1980.
Earthtech research corporation. Innovative geotechnical approaches to the remedial in-situ treatment of hazardous materials disposal sites.
Proceedings of the 1980 Conference on Control of Hazardous Material Spills, U.S. EPA, USCG, Vanderbilt University Louisville, 13-15 mei 1980, pp 421-426.
- Liskowitz, J.J., J. Schuring en J. Mack, 1993.
Application of pneumatic fracturing extraction for the effective removal of volatile organic compounds in low permeable formations.
National Ground Water Association, Eastern Regional Ground Water Focus Conference Proceedings, september 1993.
- Lundy, D.A., C.J. Carleo en M.M. Westerheim, 1994.
Hydrofracturing bedrock to enhance dnapl recovery.
Proceedings of the 8th Annual NGWA National Outdoor Action Conference, mei 1994.
- Mahrer, K.D., 1993.
Microseismic logging: a new hydraulic fracture diagnostic method.
SPE Formation evaluation - Society of Petroleum Engineers, 8.1, 1993, pp 41-49.
- Malekzadeh, D., F.U. Khan en J.J. Day, 1996.
Analysis of pressure behaviour of hydraulically fractured vertical wells by the effective hydraulic fracture length concept.
Journal of Canadian Petroleum Technology, 35.3, 1996, pp 36-43.
- McKay, L.D., J.A. Cherry en R.W. Gillham, 1993.
Field experiments in a fractured clay till. 1. Hydraulic conductivity and fracture aperture.
Water Resources Research, 29.4, 1993, pp 1149-1162.

- Meadows, M.A. en D.F. Winterstein, 1994.
Seismic detection of a hydraulic fracture from shear-wave VSP data at Lost Hills Field, California.
Geophysics, 59.1, 1994, pp 11-26.
- Metcalf & Eddy, Inc., 1991.
Handbook stabilization technologies for RCRA corrective actions.
Augustus 1991.
- Olschewski, A., et al., 1995.
Sulphur hexafluoride as a gas tracer in soil venting operations.
Environmental Science and Technology, 29.1, 1995, pp 264-266.
- Rahim, Z. en S.A. Holditch, 1995.
The effects of mechanical properties and selection of completion interval upon the created and propped fracture dimensions in layered reservoirs.
Journal of Petroleum Science and Engineering, 13, 1995, pp 29-45.
- Rahim, Z. en S.A. Holditch, 1995b.
Using a three-dimensional concept in a two-dimensional model to predict accurate hydraulic fracture dimensions.
Journal of Petroleum Science and Engineering, 13, 1995, pp 15-27.
- Schjerven, Haavald H., 1996.
Hydrofracturing guarantees water in hard rock formations.
Groundwater Development, juni 1996, pp 42-43.
- Schuring, J.R. en P.C. Chan, 1992.
Removal of contaminants from the vadose zone by pneumatic fracturing.
U.S. Geological Survey, januari 1992.
- Schuring, J.R., et al., 1993.
Pneumatic fracturing of low permeability formations.
U.S. Environmental Protection Agency, EPA/600/R-93/040, 1993.
- Schuring, J.R., P.C. Chan en T.M Boland, 1995.
Using pneumatic fracturing for in-situ remediation of contaminated sites.
Remediation, spring 1995, pp 77-90.
- Shah, S.N., 1996.
Suspension in hydraulic fracturing.
ACS Advances in Chemistry Series, 251, 1996, pp 565-600.
- Stow, S.H., C.S. Haase en H.O. Weeren, 1994.
Waste disposal by hydrofracture and application of the technology to the management of hazardous wastes.
Delivery Technique, 1994, pp 138-144.

- Swadener, J.G. en N.C. Huang, 1992.
An investigation of hydraulic fracturing. Part II: Two-phase flow model.
Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 18.2, 1992, pp 103-114.
- USEPA, 1993b.
Hydraulic fracturing technology: Technology demonstration summary.
EPA/540/SR-93/505, 1993.
- USEPA, 1993c.
Technology evaluation and applications analysis reports: University of Cincinnati/Risk Reduction
Engineering Laboratory: Hydraulic fracturing technology.
EPA/540/R-93/505, september 1993.
- Vernese, F.J., A.P. Schechter en T. Helgason, 1994.
Design and installation of a ground water interceptor/collection trench and treatment system.
Delivery Technique, 1994, pp 145-154.
- Vreeburg, R.J., et al., 1994.
Proppant back production during hydraulic fracturing - A new failure mechanism for resin-coated proppants.
Journal of Petroleum Technology, 46.10, 1994, pp 884-889.
- Warpinski, N.R., 1996.
Hydraulic diagnostics.
Journal of Petroleum Technology, 48.10, 1996, pp 907-914.
- Wolf, A. en L. Murdoch, 1993.
Field test of the effect of sand-filled hydraulic fractures on air flow in silty clay till.
Proceedings of the 7th National Outdoor Action Conference, mei 1993.
- Yang, Z., D.G. Crosby en A.K. Khurana, 1996.
Multivariate optimisation of hydraulic fracture design.
APPEA Journal - Australian Petroleum Production and Exploration Association, 36.1, 1996,
pp 516-527.
- Yegulalp, T.M. en K. Kim, 1996.
Application of percolation theory to the assessment of permeability enhancement by micro-hydrofracturing for in situ copper leaching.
Mining Engineering, januari 1996, pp 45-48.

BIJLAGE A

TOEPASSINGSGBIEDEN VOOR HYDROFRACTURE IN NEDERLAND

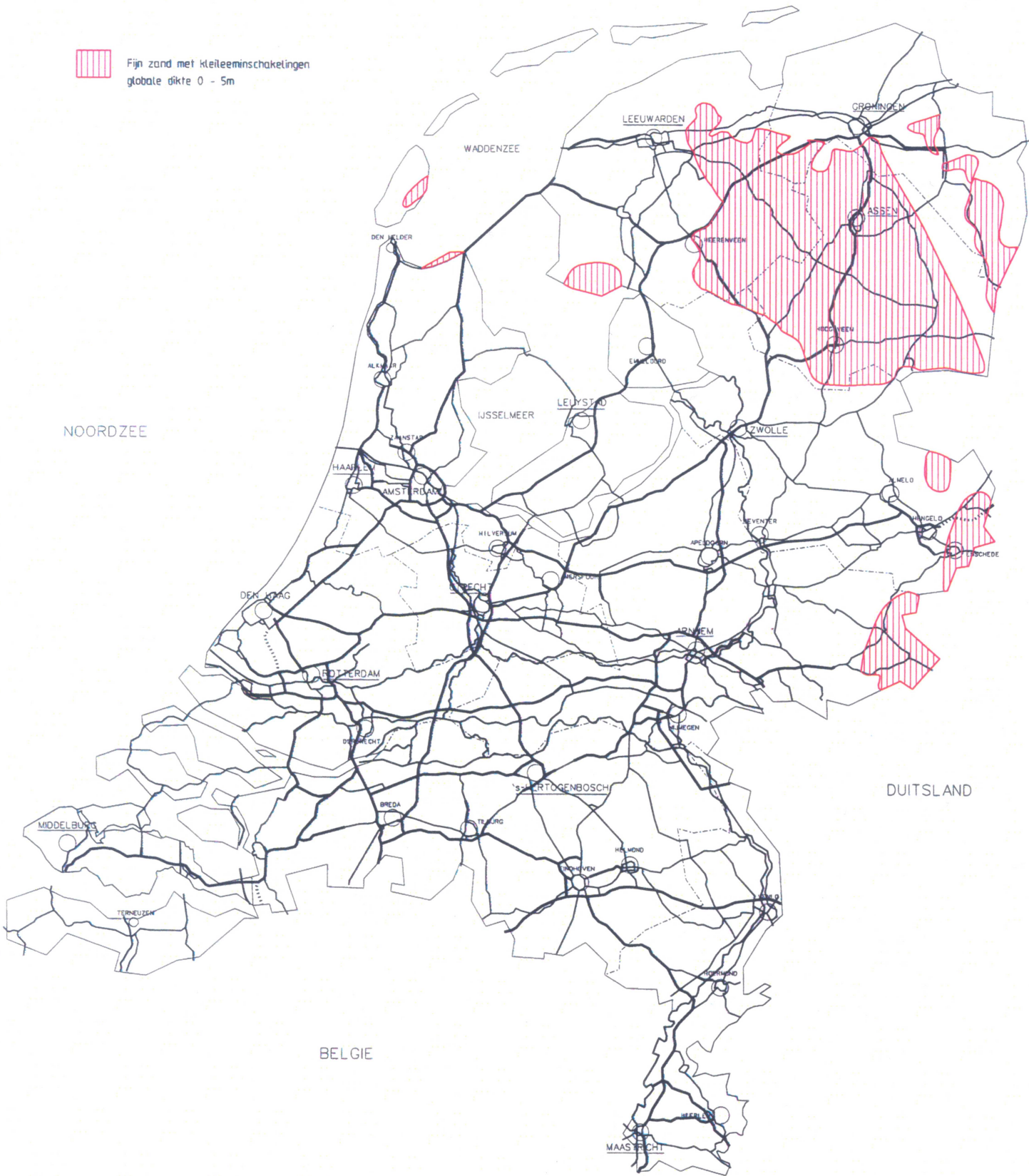


Fig. A1. Hydrofracture toepassingsgebieden fijn zand.

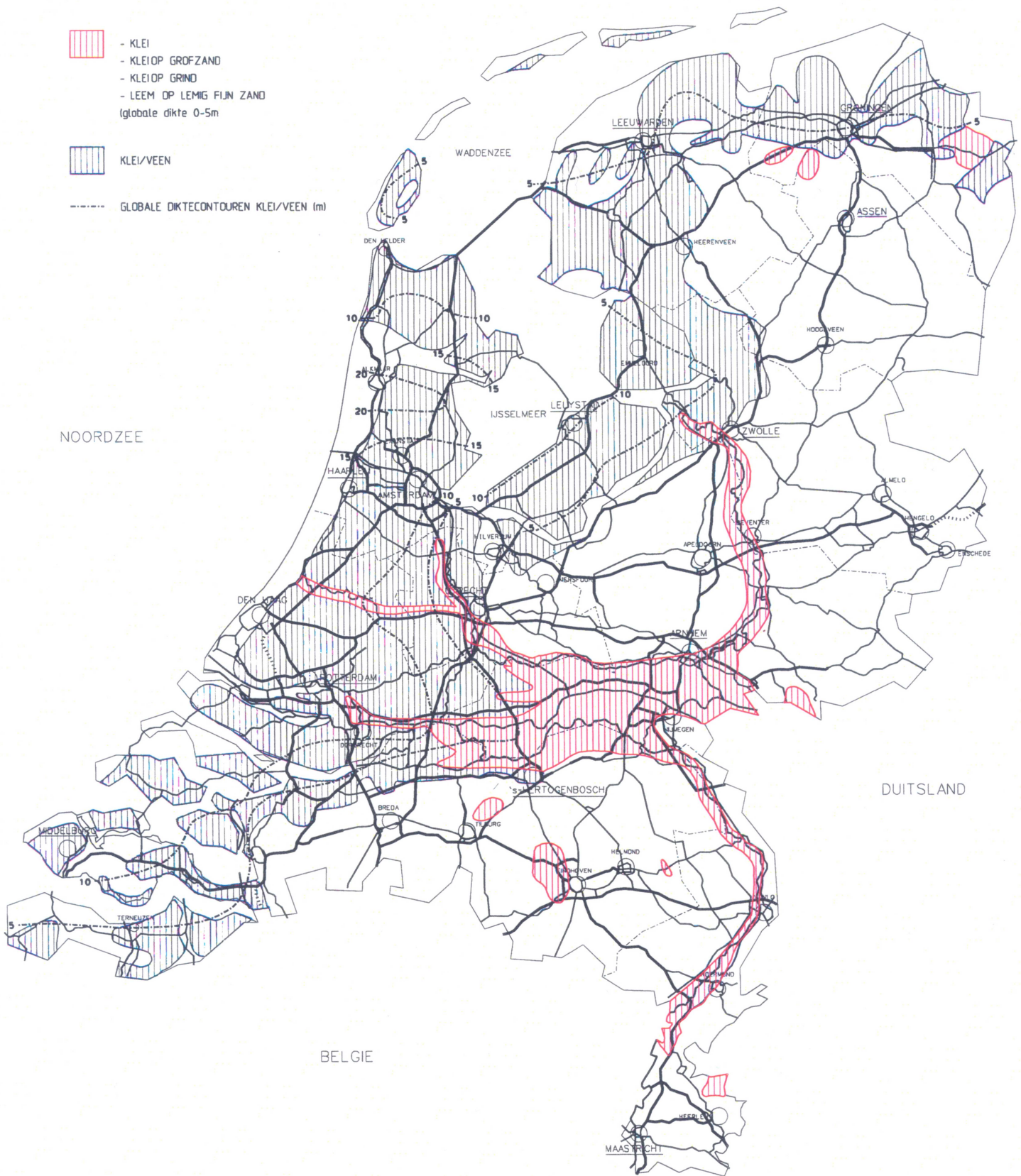


Fig. A2. Hydrofracture toepassingsgebieden klei.

BIJLAGE B

RESULTATEN VAN ENKELE EPA-PROJECTEN

Bron: EPA542-K-94-005, april 1995, In Situ Remediation Technology Status Report: Hydraulic and Pneumatic Fracturing, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response, Technology Innovation Office, Washington, DC 20460.

Teneinde geen informatie verloren te laten gaan, zijn de geval-studie's integraal en onvertaald overgenomen.

Gebruikte afkortingen

BTEX	= Benzene, Toluene, Ethyl benzene, Xylene
CERCLA	= Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act
DNAPL	= Dense Non-Aqueous Phase Liquid
DOE	= Department of Energy
PAH	= Poly-Aromatic Hydrocarbon
PCE	= Tetrachloroethylene (Perchloroethylene)
RCRA	= Resource Conservation and Recovery Act
SITE	= Superfund Innovative Technology Evaluation Program
SVE	= Soil Vapor Extraction
SVOC	= Semi-Volatile Organic Compound
TCA	= 1,1,1-Trichloroethane
TCE	= Trichloroethylene
TPH	= Total Petroleum Hydrocarbon
VOC	= Volatile Organic Compound

Voorbeeld site 1

Industrial Site, Hillsborough, New Jersey, Pneumatic Fracturing Extraction (PFE), Accutech Remedial Systems

Description of Demonstration:

Fracture wells were drilled in the contaminated vadose zone of a siltstone formation and left as open boreholes. The pneumatic fracturing process was applied to isolated two foot intervals of the formation. Short bursts (less than 20 seconds) of air were injected into the formation at successive depth intervals of the fracture well to create an intensely fractured unsaturated zone. Each injection extended and enlarged existing fissures in the formation and created new fissures, primarily in the horizontal direction. Following fracturing, contaminated vapors were extracted from the fracture well utilizing a vacuum.

Wastes Treated:

VOCs and SVOCs including TCE, PCE, and benzene.

Status:

A demonstration was conducted under the SITE Demonstration Program in the summer of 1992.

Demonstration Results:

The PFE process was observed to increase extracted air flow by more than 600 % relative to that achieved in the site formation prior to the application of pneumatic fracturing. Even higher

air flow rate increases (19,000 %) were observed when one or more of the monitoring wells were opened to serve as a passive air inlet to enter the formation. The effective radius of influence was observed to increase from 380 square feet to at least 1254 square feet, an increase of over threefold. Pressure data, collected at perimeter monitoring wells, and surface heave measurements indicate that fracture propagation extended well past the farthest monitoring wells (at 20 feet) to at least 35 feet.

While TCE concentrations in the air stream remained approximately constant at roughly 50 parts per million, the increased air flow rate resulted in an increase in TCE mass removal of 675 %. When wells were opened to passive air inlet, the increase in TCE mass removal was 2300 % following the application of pneumatic fracturing. Additional, chemical analysis of the extracted air during post-fracture testing showed high concentrations of organic compounds that had only been detected in trace amounts prior to application of pneumatic fracturing. This confirmed that the pneumatic fracturing process had effectively accessed pockets of previously trapped VOCs. The cost for full-scale remediation was estimated at \$ 307/kg (\$ 140/lb) of TCE removed based on the demonstration and information provided by the developer.

Voorbeeld site 2

Closed UST, Military Facility, Oklahoma City, Oklahoma, Pneumatic Fracturing Extraction (PFE), Accutech Remedial Systems

Description of Demonstration:

Pneumatic fracturing was used to enhance the rate of #2 fuel oil recovery in a sandstone/shale formation. The free product was trapped in porous layers beneath fine textured confining zones and beneath a decommissioned tank. Several recovery wells had been installed in the vicinity of the closed tank, but the recovery rates were very low. A single pneumatic injection was applied adjacent to the tank at a depth between 26 and 28 feet to increase the yield of the free product from the formation.

Wastes Treated:

#2 fuel oil existing as free product.

Status:

The project was conducted under DOE & DOD grant in conjunction with the Hazardous Substance Management Research Center. Further application of the technology occurred at the site in 1995.

Demonstration Results:

Pneumatic fracturing provided direct access to the trapped oil, as was observed during static conditions. Prior to fracturing, oil in a recovery well eight feet from the fracture well would reach static conditions after approximately 300 hours with 1.5 feet of free product floating on the water table. Following application of pneumatic fracturing, equilibrium was attained in only 80 hours when the well contained 20.2 feet of free product.

Pump system operations, including additional recovery wells on site, further showed the increased rate of product recovery. During the 17 months prior to pneumatic fracturing, the system averaged 155 gallons of free product recovered per month. Following application of pneumatic fracturing this rate increased to 435 gallons per month. The total amount of free product recovered in seven months following pneumatic fracturing application surpassed the total recovered over the life of the system in the previous 17 months.

Pneumatic fracturing also was demonstrated to increase the ratio of oil to water recovered from the formation. During pre-fracture pumping, the product represented only an average of 12 percent of the total fluid recovered. Following pneumatic fracturing application oil was 74 percent of the total fluids recovered. This reduced water treatment costs tremendously.

Voorbeeld site 3

Industrial Facility, Santa Clara, California, Pneumatic Fracturing Extraction (PFE), Accutech Remedial Systems

Description of Demonstration:

A pneumatic fracturing well was installed in the vadose zone contaminated by TCE. The site geology featured a semi-permeable layer of sandy silts and sandy clays overlaying a "fat" silty clay with very little permeability. During standard vapor extraction operations, the majority of the soil vapor extracted was from the high permeability zones, leaving the lower permeability clay unaffected. Pneumatic fracturing was applied in successive two foot intervals particularly to create permeability uniformity across the various zones of the formation.

Wastes Treated:

VOCs, primarily TCE.

Status:

The project was conducted as a pilot test in July 1993.

Demonstration Results:

The rate of air flow increased 3.5 times during extraction tests utilizing the entire fracture well. More dramatic was the increase in permeability in the clay zones, where the permeability rose up to 510 times.

The rate of TCE mass removal increased six times during extraction tests from the fracture well. The greatest increases in TCE mass removal were observed in the clay zones, where the contaminants were removed at a rate of up to 46,000 times greater than the natural un-fractured condition.

Pneumatic fracturing was effective for making the permeability of the formation more uniform, thereby allowing extraction air to flow through and remediate the formerly low permeability clay zones of the formation.

Voorbeeld site 4

Former Manufacturing Facility, Highland Park, New Jersey, Pneumatic Fracturing Extraction (PFE), Accutech Remedial Systems

Description of Demonstration:

Pneumatic fracturing was used to increase formation transmissivity and vadose zone permeability in a fractured shale formation contaminated with trichloroethylene. Previous attempts to remediate the site utilizing standard Dual Vapor Extraction (DVE) combined with air injection had been ineffective due to low air flow rates, small and sporadic vacuum influence, and an inability to effectively control the ground water. Two foot pneumatic injections were applied at successive intervals to a depth of 25 feet in two 4" open rock wells. Following application of pneumatic fracturing, the ground water in the test area was effectively controlled via pumping, and each of the fracture wells was placed under a vacuum.

Wastes Treated:

VOCs, primarily TCE.

Status:

This project was conducted as first step to final Remedial Action in July of 1994. Full remediation system featuring Pneumatic Fracturing is being constructed in the Spring/Summer of 1995 under the EPA SITE Demonstration Program.

Preliminary Results: Pneumatic Fracturing was demonstrated to effectively improve the hydraulic connection between the wells in the test area. Prior to application of pneumatic fracturing, only minimal (less than 0.2') ground water drawdown influence was observed at wells on site. Following pneumatic fracturing, the formation was effectively dewatered to expose the vadose zone to effective vacuum influence.

Extraction of TCE vapors following pneumatic fracturing also showed a much higher rate of mass removal. The average rate of mass removal after pneumatic fracturing was over three times the peak rate of mass removal during the DVE pilot test before pneumatic fracturing. The greater rate of TCE mass removal reduced the design for the full-scale remediation system duration from ten years to two years.

The vacuum radius of influence increased from 11 feet prior to application of pneumatic fracturing to between 15 and 40 feet (influence varied between strike and dip). Vacuum influence became a predictable function of strike and dip rather than an unpredictable product of formation heterogeneities. The much greater radius of influence substantially reduced the number of wells required and tremendously reduced remediation system installation costs.

Voorbeeld site 5

Manufacturing Facility in New York; Service Station in Louisiana, Injection Vac Pneumatic Fracturing, Terra Vac, Inc.

Description of Demonstration:

Pneumatic fracturing is used to supplement soil vapor extraction in low permeability formations where diffusive flow of soil vapor is poor. Air at high pressure is injected into the zone of low permeability via fracturing probes. The high pressure air fractures low permeability soils, enhancing advective flow by creating microfractures which act as new flow paths through the soil matrix. The additional flow paths enhance the advective mass transfer of volatile contaminants to increase contaminant extraction rates and shorten cleanup time. Injection Vac™ is Terra Vac's term for the combination of pneumatic fracturing with soil vapor extraction in low permeability soils.

Wastes Treated:

TCE, PCE, BTEX, and other VOCs.

Status:

The technology was demonstrated and commercialized beginning in 1990.

Demonstration Results:

At the New York manufacturing site in July 1990, pneumatic fracturing was used to enhance recovery of TCE and other VOCs from low permeability clays. Dual vacuum extraction (simultaneous recovery of soil vapors and ground water) had proven only slightly effective in removing VOCs from the site. During the initial application of pneumatic fracturing, the concen-

tration of VOCs in the extracted air stream increased one order of magnitude from 20 mg/L to 200 mg/L. Extracted air flows did not increase appreciably. Pneumatic fracturing is thought to have redistributed subsurface flow. The Injection Vac™ phase of operations doubled the recovery of VOCs compared to dual vacuum extraction without pneumatic fracturing over similar operating times. This operation was a pilot test to demonstrate the in situ remediation process. The system removed 340 kg (750 lb) of VOCs in 200 days.

At the Louisiana service station in November 1991, pneumatic fracturing was used to enhance recovery of gasoline-range VOCs from firm, plastic clays. Permeability testing of the soil indicated hydraulic conductivities of 10^{-8} cm/sec. The clay layer was 23-26 feet thick. Initial air flow rates from a dual vacuum extraction system were 10-15 standard cubic feet per minute (scfm). Injection Vac™ operations yielded 16-23 scfm. VOC extraction rates more than doubled following pneumatic fracturing. The pilot operations removed over 650 kg (1400 lb) of VOCs over 6 days. Full scale operations remediated the site in just over a year.

Capital and operating costs of Injection Vac™ are slightly higher than vacuum extraction without enhancement. The added costs of a suitably sized air compressor and, possibly, a high vacuum pump with additional energy and maintenance costs for soil vapor recovery must be factored into the overall cost. The major benefits are shorter remediation time and more effective subsurface remediation than standard, unenhanced extraction with low flow.

Voorbeeld site 6

Gasoline Refinery in Marcus Hook, PA, Pneumatic Fracturing/Bioremediation, New Jersey Institute of Technology

Description of Demonstration:

The technology uses pneumatic fracturing to enhance microbial processes. Aerobic processes dominate at the fracture interfaces and, to a limited distance, into the soil away from the fracture. Depletion of oxygen during aerobic biodegradation allows methanogenic and denitrifying populations to form at greater distances from the fractures. Contaminants diffuse toward the fracture, serving as a substrate for various microbial populations. This enhances the growth of aerobic microbial populations by reducing substrate concentrations in the denitrifying and methanogenic zones.

The site was pneumatically fractured and periodic injections were performed over a period of 12 months. Subsurface injections introduced nitrate and ammonium salt in the form of calcium ammonium nitrate to facilitate the development of aerobic, denitrifying, and methanogenic biodegradation zones. Off-gases from the monitoring wells were analyzed for benzene, toluene, and xylenes (BTX), oxygen, methane, and carbon dioxide to evaluate process effectiveness. Additional soil borings were carried out and samples analyzed to measure the change in extent of site contamination as a result of the process. Carbon mass balances considering contaminant reduction, carbon dioxide evolution, methane evolution, and contaminant recovery through vapor extraction were used to evaluate process performance.

Wastes Treated:

BTEX.

Status:

Field scale pilot testing was completed in March 1995 under the SITE Emerging Technology Program.

Demonstration Results:

Initial site characterization indicated low subsurface permeability and the presence of BTX at concentrations of up to 1500 ppm in the soil phase. Results show that fracturing increased subsurface permeability by up to 40 times within an effective radius of approximately 20 feet.

After one year of sampling and monitoring, soil samples at the end of the demonstration show a 79 % reduction in soil-phase BTX concentrations. Results from the analysis of soil samples obtained from three distinct depths of the soil bed in the pre-demonstration stage were compared with those in the post-demonstration stage. From these results, the total mass of BTX removed was computed to be 22 kg. Based on periodic soil-gas sampling, the mass of BTX removed through vapor extraction was computed to be 3.1 kg or 11 %. Vapor extraction was the predominant abiotic mode of BTX removal. The other abiotic pathways—BTX losses through fracture and amendment injections, perched water removal, and passive volatilization—accounted for a total of 0.8 kg or 4 % based on mean BTX concentrations. The mass of BTX removed by biodegradation was calculated to be over 82 %.

Voorbeeld site 7

LUST site near Dayton, Ohio, Hydraulic Fracturing, National Risk Management Research Laboratory, University of Cincinnati

Description of Demonstration:

The fracturing is created when fluid is pumped down a borehole until a critical pressure is reached to fracture the soil. Sand-laden slurry is then pumped into the fracture to create a highly permeable pathway that enhances delivery of the bioremediation organisms. At this site, there were two wells. One well was fractured at 4, 6, 8, and 10 feet below the ground surface. Hydrogen peroxide and nutrients were added to both wells.

Wastes Treated:

BTEX and TPH.

Status:

The demonstration was completed in September 1992.

Demonstration Results:

Fluid flow rates into the fractured well were 25 to 40 times greater than into the unfractured well. After one month, soil moisture content 5 feet from the fractured well was 1.4 to 4 times greater than the unfractured well. Moisture content generally was greater near the fracture, with the largest increase near the uppermost fracture. The same trends in moisture content were also observed at 10 and 15 feet from the wells. Effectiveness of the bioremediation was measured by reduction in BTEX and TPH concentrations in soil samples. Bioremediation at 5 feet from the fractured well after 1 month was 97 % for Ethyl benzene and 77 % for total petroleum hydrocarbons compared with 8 % and 0 % respectively near the unfractured well. After six months, benzene, Ethyl benzene, and TPH continued to have a higher degradation percentage near the fractured well than the unfractured well. However, considerable variation among the degradation data is evident and may be due to local variations in contaminant concentration that was unresolved by sampling.

Voorbeeld site 8

Site in Bristol, Tennessee, Hydraulic Fracturing, Remediation Technologies, Inc.

Description of Demonstration:

Naturally propped fractures were created at depths of 100 to 200 feet in rock to enhance the recovery of free-phase TCE and other DNAPLs. The fractures were created by injecting water into sections of the well isolated by straddle packers. Three wells were drilled to approximately 200 feet. Pumping tests and vapor extraction tests were conducted to evaluate the effects of the fractures.

Wastes Treated:

TCE.

Status:

The process was demonstrated with vapor extraction in July 1991.

Demonstration Results:

The specific discharge of the three wells increased by factors ranging from 2.8 to 6.2. Pumping test results indicate that hydraulic conductivity increased by factors of 20 or more. Vapor extraction appeared to be a feasible remedial technique after fractures were induced. Vapor discharges were on the order of 285 to 700 L/min and suction could be detected 33 feet from the recovery well after fracturing. Both discharge and suction had been negligible prior to fracturing. During a two-day test of vapor extraction, DNAPLs were recovered at a rate of approximately 82 kg/day.

Voorbeeld site 9

Site in Oak Brook, Illinois, Hydraulic Fracturing, University of Cincinnati

Description of Demonstration:

The site contains solvents that were spilled during the filling of a storage tank. The site is underlain by silty clay till contaminated with TCE, TCA, DCA, PCE, and other solvents to depths of 20 feet. Since the low conductivity of the site hindered vapor extraction, hydraulic fractures were created at depths of 6, 10, and 15 feet below-ground at two locations. Multi-level recovery wells were installed to connect each fracture individually to a two-phase vapor extraction system. The vapor flow rates and contaminant concentration were measured using variable area flow meters and gas chromatography.

Wastes Treated:

TCE, TCA, DCA, PCE.

Status:

The demonstration took place over 21 weeks beginning in July 1992.

Demonstration Results:

The average discharge rates from the fractured wells were 15 to 20 times greater than the unfractured well. Discharge from the fractured wells tended to fluctuate, possibly due to changes in the ground-water recharge caused by rainfall. Total recoveries for ten compounds were computed for each well from concentration and discharge rates. Recovery performances from the fractured wells were approximately one order of magnitude greater than that from the unfractured well. Recovery rates from all wells decreased through time.

Voorbeeld site 10

EPA Center Hill Testing Facility, Cincinnati, Ohio, Hydraulic Fracturing, University of Cincinnati

Description of Demonstration:

The EPA Center Hill Facility is an uncontaminated testing facility in Cincinnati underlain by silty clay with soil and gravel. Five wells were installed to compare the differences in performance of fractured and unfractured wells. Three wells were hydraulically fractured and the performance of these wells was compared to two unfractured wells. The wells were connected to a vacuum blower. Pneumatic piezometers were installed around the wells to measure suction head in the soil.

Wastes Treated:

None.

Status:

The demonstration took place in January 1992.

Demonstration Results:

Well discharge, as both vapor and liquid, was an order of magnitude greater for the fractured wells than the unfractured wells. For the fractured wells, the rate corresponded strongly with precipitation. The vented fracture was more responsive to rainfall than the unvented fractures. The conventional wells were unaffected by rain. Suction head was detectable at a greater distance from the wells with fractures than from the wells without fractures. Around the conventional wells, suction was 1.18 inches of water at a distance of 3.3 feet. The same suction head could be observed 25 feet from the fractured wells.

Voorbeeld site 11

Storage Tank Site in Beaumont, Texas, Hydraulic Fracturing, University of Cincinnati

Description of Demonstration:

Sand-filled hydraulic fractures were created in swelling clay to enhance the recovery of free-phase LNAPLs. The area contained gasoline and cyclohexane approximately 5 to 10 feet from the surface spill. The pilot test compared the performance of two designs of fractured wells to a control well. One of the fractured wells consisted of two casings that access fractures at different depths, one in the LNAPL and the other in the water bearing zone below. The other well contained one fracture near the bottom of the NAPL zone. The test was designed to recover NAPL from the upper fracture and water from the lower one.

Wastes Treated:

Gasoline and cyclohexane.

Status:

Fractures were created in July 1993 and a pilot test was conducted in February 1994.

Demonstration Results:

Both wells containing fractures produced LNAPL at rates an order of magnitude or greater than the conventional well.