

NOBIS 95-1-13  
PERSLUCHTINJECTIE IN VOGELVLUCHT

dr.ir. E.C.L. Marnette (Tauw bv)  
ir. C.G.J.M. Pijls (Tauw bv)

april 2000

Gouda, CUR/NOBIS

### **Auteursrechten**

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

Het is toegestaan overeenkomstig artikel 15a Auteurswet 1912 gegevens uit deze uitgave te citeren in artikelen, scripties en boeken mits de bron op duidelijke wijze wordt vermeld, alsmede de aanduiding van de maker, indien deze in de bron voorkomt, "©"Persluchtinjectie in vogelvlucht", april 2000, CUR/NOBIS, Gouda."

### **Aansprakelijkheid**

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

### **Copyrights**

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

It is allowed, in accordance with article 15a Netherlands Copyright Act 1912, to quote data from this publication in order to be used in articles, essays and books, unless the source of the quotation, and, insofar as this has been published, the name of the author, are clearly mentioned, "©"Persluchtinjectie in vogelvlucht", April 2000, CUR/NOBIS, Gouda, The Netherlands."

### **Liability**

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

**Titel rapport**

Persluchtinjectie in vogelvlucht

**CUR/NOBIS rapportnummer**

95-1-13

**Project rapportnummer**

95-1-13

---

**Auteur(s)**dr.ir. E.C.L. Marnette  
ir. C.G.J.M. Pijls**Aantal bladzijden****Rapport:** 18  
**Bijlagen:** -

---

**Uitvoerende organisatie(s) (Consortium)**BP Oil Europe (dhr. J.T. Walden, 00 44 19 32 764 794)  
EPON (dhr. H. Jansen, 00 31 38 42 72 912)  
Grondmechanica Delft (drs. C.C.D.F. van Ree, 00 31 70 377 17 93)  
Tauw bv (ir. C.G.J.M. Pijls, 00 31 570 69 97 66)  
Gemeentelijk Havenbedrijf Rotterdam (drs. A.J.M. Schelwald-v.d. Kley, 00 31 320 21 89 00)  
Shell International Oil Products (ir. C.D. Parkinson, 00 31 70 37 71 793)  
WU vakgroep Bodemkunde (dr.ir. S.E.A.T.M. van der Zee, 00 31 317 48 37 66)  
BodemMilieuSystemen (dr.ir. C. Vreeken, 00 31 10 511 13 01)

---

**Uitgever**

CUR/NOBIS, Gouda

---

**Samenvatting**

"Persluchtinjectie in vogelvlucht" is één van de publicaties, als resultaat van een vierjarig onderzoek naar ontwerp, dimensionering en uitvoering van persluchtinjectie als techniek voor sanering van verontreinigde bodem en grondwater. Het onderzoek beoogde praktische richtlijnen op te stellen voor het ontwerpen en uitvoeren van in situ saneringen met persluchtinjectie. Omdat niet alleen ontwerpers en uitvoerders te maken hebben met in situ technieken, zoals persluchtinjectie, is "Persluchtinjectie in vogelvlucht" opgesteld. "Persluchtinjectie in vogelvlucht" is gericht op bedrijven en instanties die in aanraking komen met persluchtinjectie. Het beoogt op een beknopte wijze informatie te verschaffen omtrent de mogelijkheden, beperkingen en aandachtspunten bij de uitvoering van in situ saneringen met persluchtinjectie. In het kader van deze studie is eveneens een ontwerpers- en uitvoerdershandboek, "In situ air sparging - A Technical Guide", opgesteld. Voor de lezer die uitgebreidere technische informatie wil hebben over persluchtinjectie verwijzen wij naar deze Technical Guide.

---

**Trefwoorden****Gecontroleerde termen:**bioventing, kennissystemen, monitoring,  
persluchtinjectie**Vrije trefwoorden:**archetypes, haalbaarheid, ontwerp,  
sparging, tracer test

---

**Titel project**

Biosparging en Bioventing

**Projectleiding**Tauw bv (ir. C.G.J.M. Pijls,  
Tel. 00 31 570 69 97 66)

---

Dit rapport is verkrijgbaar bij:

CUR/NOBIS, Postbus 420, 2800 AK Gouda

**Report title**  
Persluchtinjectie in vogelvlucht

**CUR/NOBIS report number**  
95-1-13

**Project report number**  
95-1-13

---

**Author(s)**  
dr.ir. E.C.L. Marnette  
ir. C.G.J.M. Pijls

**Number of pages**  
**Report:** 18  
**Appendices:** -

---

**Executive organisation(s) (Consortium)**

BP OIL Europe (Mr J.T. Walden, 00 44 19 32 764 794)  
EPON (Mr H. Jansen, 00 31 38 42 72 912)  
Delft Geotechnics (Mr C.C.D.F. van Ree, 00 31 70 377 17 93)  
Tauw bv (Mr C.G.J.M. Pijls, 00 31 570 69 97 66)  
Rotterdam Municipal Port Management (Mrs A.J.M. Schelwald-v.d. Kley, 00 31 320 21 89 00)  
Shell International Oil Products (Mr C.D. Parkinson, 00 31 70 37 71 793)  
WU vakgroep Bodemkunde (Mr S.E.A.T.M. van der Zee, 00 31 317 48 37 66)  
BodemMilieuSystemen (Mr C. Vreeken, 00 31 10 511 13 01)

---

**Publisher**  
CUR/NOBIS, Gouda

---

**Abstract**

"Persluchtinjectie in vogelvlucht" is one of the deliverables of a four year research program into the design of sparging systems to remediate contaminated soils and groundwater by in situ air sparging (IAS). The research was focused on determining practical rules for the design of sparging systems. Besides the practitioners, also managers and executives will be confronted with decisions concerning treatment of soil contamination with sparging. "Persluchtinjectie in vogelvlucht" is specifically set up for the managers in private companies and authorities, involved in decision-making concerning soil remediation. It addresses the relevant issues of design and implementation of sparging systems (possibilities, limitations and important considerations).

More extensive information on design of sparging systems can be found in the publication "In situ air sparging - A Technical Guide".

---

**Keywords**

**Controlled terms:**

bioventing, compressed air injection,  
knowledge systems, monitoring

**Uncontrolled terms:**

archetypes, design, feasibility,  
sparging, tracer test

---

**Project title**  
Biosparging and Bioventing

**Projectmanagement**  
Tauw bv (ir. C.G.J.M. Pijls,  
Tel. 00 31 570 69 97 66)

---

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

## VOORWOORD

Voor u ligt "Persluchtinjectie in vogelvlucht". Deze publicatie is voortgekomen uit een NOBIS-onderzoek naar de mogelijkheden en onmogelijkheden van persluchtinjectie (Biosparging en Bioventing). Persluchtinjectie is een in situ bodemsaneringstechniek, gebaseerd op het in de bodem brengen van lucht onder de grondwaterspiegel. Naar de toepassingsmogelijkheden en beperkingen van deze techniek is in het kader van NOBIS door meerdere partijen praktijkonderzoek uitgevoerd.

Het onderzoek is met name gericht op de toepasbaarheid en het ontwerp van persluchtinjectiesystemen. Bioventing van de onverzadigde zone is een effect van persluchtinjectie en is als zodanig behandeld in het project. Het ontwerp van bioventingsystemen voor bodemsanering is niet als separaat onderwerp opgenomen, omdat dit onderwerp in het verleden reeds uitvoerig onder de aandacht is gebracht in onderzoeksprojecten.

De resultaten van deze studie hebben geleid tot een ontwerpers- en uitvoerdershandboek, "In situ air sparging - A Technical Guide". Omdat niet alleen ontwerpers en uitvoerders te maken hebben met in situ technieken, zoals persluchtinjectie, is "Persluchtinjectie in vogelvlucht" opgesteld. "Persluchtinjectie in vogelvlucht" is gericht op bedrijven en instanties die in aanraking komen met persluchtinjectie. Het beoogt op een beknopte wijze informatie te verschaffen omtrent de mogelijkheden, beperkingen en aandachtspunten bij de uitvoering van in situ saneringen met persluchtinjectie. Voor de lezer die uitgebreidere technische informatie wil hebben over persluchtinjectie verwijzen wij naar de Technical Guide.

Deze publicatie was niet mogelijk geweest zonder de medewerkers, die ook aan het tot stand komen van de Technical Guide hun bijdrage hebben geleverd en die wij bij deze willen bedanken. De auteurs, Derk van Ree, Frank Boelsma, Kees Vreeken en Dirk Peereboom. De consortiumleden Lyda Schelwald-v.d. Kley, Peter van Mullekom, Terry Walden, Chris Parkinson en Herman Jansen. De kritische reviewers Rick Johnson, Chris Neaville, Jos Hullegie, Pim Vis, Koen Weytingh en Anno van Diem.

Emile Marnette  
Charles Pijls

april 2000

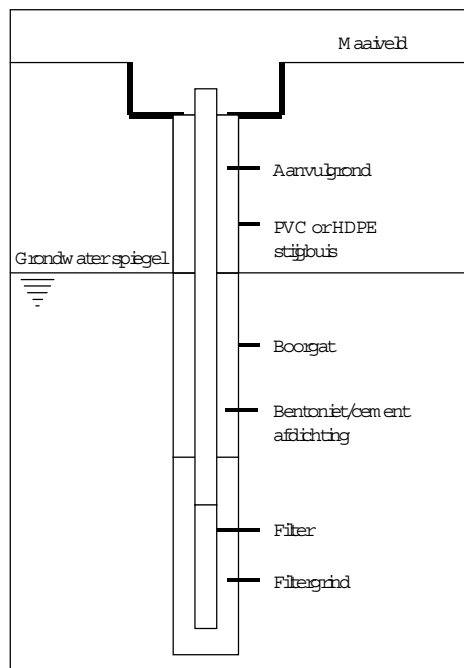
## INHOUD

Hoofdstuk	1	WAT IS PERSLUCHTINJECTIE	1
	1.1	Werking van persluchtinjectie	1
	1.2	Effecten van persluchtinjectie	3
	1.3	Bovengrondse activiteiten voor aanvang	4
	1.4	Met welke vergunningen moet rekening worden gehouden	4
Hoofdstuk	2	WANNEER EN HOE KAN PERSLUCHTINJECTIE WORDEN TOEGEPAST?	5
	2.1	Toepasbaarheid van persluchtinjectie	5
	2.1.1	Eigenschappen van de bodem	5
	2.1.2	Eigenschappen van verontreinigingen	6
	2.2	Toepassingsmogelijkheden van persluchtinjectie	7
Hoofdstuk	3	WELKE RESULTATEN KUNNEN MET PERSLUCHTINJECTIE WORDEN BEREIKT?	9
	3.1	Eindgehalten	9
	3.2	Tijdsduur	9
	3.3	Rebound effect	9
Hoofdstuk	4	HOE KAN DE WERKING VAN EEN PERSLUCHTINJECTIE-SYSTEEM WORDEN GECONTROLEERD?	10
	4.1	Saneringsparameters	10
	4.2	Performance parameters	10
	4.3	Rebound	12
Hoofdstuk	5	WAT ZIJN DE RISICO'S BIJ UITVOERING VAN IN SITU SANERING MET PERSLUCHTINJECTIE EN HOE HIERMEE OM TE GAAN?	13
	5.1	Onzekerheden bij in situ sanering	13
	5.2	Bodem en verontreiniging	13
	5.3	Ontwerp en uitvoering	14
	5.4	Aanbesteding	14
	5.5	Communicatie	15
Hoofdstuk	6	WAT ZIJN DE KOSTEN?	16
	6.1	Algemeen	16
	6.2	Case: Tweejarige sanering van een drijfslag bij een benzinstation	16
	6.3	Case: Beheersing door middel van een bioscherm	16
		LIJST MET NOBIS-PROJECTEN	18

## WAT IS PERSLUCHTINJECTIE

### 1.1 Werking van persluchtinjectie

Persluchtinjectie is een bodemsaneringstechniek, waarbij lucht onder de grondwaterspiegel in de bodem wordt geperst. De lucht wordt in de bodem geperst via luchtinjectiefilters. Een luchtinjectiefilter is een deels niet geperforeerd (blind) en deels geperforeerde buis, meestal van kunststof.



De lucht, die via het filter in de bodem wordt gebracht, wordt ten gevolge van het dichtheidsverschil tussen lucht en grondwater naar de grondwaterspiegel getransporteerd. Daardoor wordt het water in de bodem opzij gedrukt en ontstaat onder de grondwaterspiegel een gedeeltelijk onverzadigde zone. Meer dan 30 % van de poriën onder de grondwaterspiegel kan met lucht gevuld zijn.

De lucht beweegt zich over het algemeen via luchtgevulde kanalen naar de grondwaterspiegel. Alleen in grove bodemmaterialen (met een korrelgrootte groter dan 0,7 tot 1 mm) zal de lucht zich in luchtbelletjes naar de grondwaterspiegel voortbewegen. Uit het oogpunt van een effectieve stofoverdracht heeft het de voorkeur om luchtbelletjes te creëren. Echter de bodemcondities (met name de poriediameter) leggen beperkingen op, waardoor meestal luchtkanalen zullen ontstaan.

De gelaagdheid van de Nederlandse bodem heeft een grote invloed op de stroming van de lucht door de bodem. Nederland is een land van rivier- en zeeafzettingen en heeft daardoor een sterk horizontaal gelaagde bodemstructuur. Een gering verschil in doorlatendheid kan een barrière vormen voor de naar de grondwaterspiegel stromende lucht. Aan de andere kant heeft de gelaagdheid van de bodem een positieve invloed op de horizontale luchtverspreiding. Bij een gering doorlatendheidsverschil tussen de verschillende lagen kan de lucht verder worden verspreid dan in een homogene bodemlaag mogelijk zou zijn.

Matig tot slecht doorlatende klei- en veenlagen vormen in de regel een barrière voor de verticale stroming van lucht. Lucht zal zich ophopen onder deze slecht doorlatende lagen en horizontaal verder stromen onder vorming van een luchtbel. Het NOBIS-project HEISA (NOBIS-project 95-1-05) heeft aangetoond dat dergelijke schijnbaar ondoordringbare kleilagen door natuurlijke processen (wortelkanalen) op microschaal toch doorlatend kunnen zijn voor lucht.

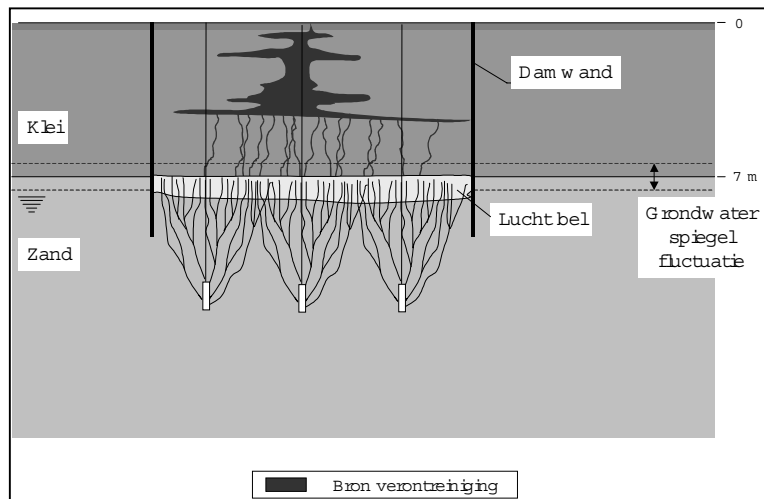


Fig. 1. NOBIS-project HEISA.

Een belangrijk ontwerpgegeven van persluchtinjectiesystemen is de onderlinge afstand van de luchtinjectiefilters. Er wordt onderscheid gemaakt in:

- Beluchtungsstraal** Het gebied waarin de poriën voor ten minste 10 % zijn verzadigd met lucht.
- Invloedsstraal** Het gebied in de bodem waar het zuurstofgehalte dermate wordt verhoogd dat aërobe biologische afbraakprocessen in gang kunnen worden gezet.

De invloedsstraal is in de praktijk groter dan de beluchtungsstraal, omdat een luchtverzadiging van minder dan 10 % ook nog kan leiden tot een voor biologische afbraak voldoende hoge zuurstofconcentratie in grondwater. Daarnaast kan de invloedsstraal zich in de loop van de tijd uitbreiden doordat de afbraak afneemt en de zuurstof ten gevolge van diffusie en mengprocessen zich verder kan verspreiden. De beluchtungsstraal is op langere tijdschaal constant.

De beluchtungsstraal die wordt gehanteerd als een persluchtinjectiesysteem moet worden aangelegd voor het saneren van een verontreinigd brongebied met hoge concentraties in de grond. De sanering van grondverontreinigingen vergt immers een intensieve beluchting. De invloedsstraal wordt gehanteerd voor het geval dat de vracht in de bodem beperkt is (bijvoorbeeld in een pluimgebied met alleen grondwaterverontreinigingen).

Het hanteren van de beluchtungsstraal als ontwerpparameter heeft de voorkeur, omdat de beluchtungsgraad bepalend is voor de aanwezigheid van zuurstof in de bodem. De beluchtungsstraal kan worden vastgesteld met meettechnieken die de geleidbaarheid van de bodem kunnen bepalen. In de praktijk wordt de beluchtungsstraal ook gebruikt voor het modelleren en ontwerpen van luchtinjectiesystemen.

**Wat is het verschil tussen sparging en biosparging?**

In de Engelstalige literatuur wordt persluchtinjectie sparging genoemd. De term biosparging wordt daarnaast sporadisch gebruikt als de nadruk van de persluchtinjectie ligt op het bewerkstelligen van de biologische afbraak van verontreinigingen.



Persluchtinjectiesystemen worden in de praktijk intermitterend aangestuurd. Op het moment dat de lucht vanaf het luchtinjectiepunt de grondwaterspiegel heeft bereikt, is de stofoverdracht minder efficiënt. De luchtinjectie kan dan worden uitgezet en na een periode van stilstand weer worden opgestart. De stilstandtijd wordt bepaald door de snelheid van zuurstofopname ten gevolge van de biologische afbraak. Typische luchtinjectietijden bedragen enkele tot tientallen minuten, waarbij met een debiet van 5 tot 20 m<sup>3</sup>/uur lucht wordt geïnjecteerd.

## 1.2 Effecten van persluchtinjectie

Met persluchtinjectie wordt lucht in de bodem gebracht. Door het onder druk inbrengen van lucht in de bodem worden een aantal gewenste en ongewenste effecten bewerkstelligd, die hier kort zullen worden beschreven:

1. vervluchtiging van verontreinigingen;
2. aërobe biologische afbraak van verontreinigingen;
3. menging van grondwater;
4. mobilisatie van puur product;
5. geotechnische effecten.

### 1. Vervluchtiging

Ten gevolge van de luchtinjectie zullen vluchtige verbindingen verdampen. In principe kunnen de gestripte verontreinigingen in de onverzadigde zone biologisch worden omgezet. De vervluchtiging van verontreinigingen vergt een intensieve injectiefrequentie. Bij het ontwerp van het systeem moet aandacht worden besteed aan de ligging en de mogelijke effecten op ondergrondse en bovengrondse infrastructuur. Indien deze niet mogen worden blootgesteld aan de geëmitteerde verontreinigde lucht, dient een luchtonttrekkingssysteem te worden geïnstalleerd.

### 2. Afbraak

De aërobe afbraak wordt gestimuleerd doordat verontreinigingen in contact komen met zuurstofrijke lucht. Daarnaast lost zuurstof op in water, waardoor de afbraak in de waterfase wordt gestimuleerd.

### 3. Menging

Door de vorming van luchtgevulde kanalen zal grondwater worden verplaatst. Deze grondwaterverplaatsing zorgt voor een betere beschikbaarheid van de verontreinigingen en daardoor voor hogere concentraties verontreinigingen in het grondwater. Op deze wijze kan de sparging bijdragen aan het uitspoelen van verontreinigingen met behulp van pump and treat systemen.

#### Is ijzer in grondwater een probleem?

IJzer lijkt minder een probleem te zijn in persluchtssystemen dan bij pump & treat systemen. Dit komt omdat het ijzer en resulterende precipitaten zich verspreiden over het relatief grote invloedsgebied van de luchtinjectie. Bij het onttrekken van grondwater worden precipitaten juist geconcentreerd in/rondom het onttrekkingsfilter of de deepwell en in de bovengrondse zuivering. IJzerproblemen bij de persluchtinjectiefilters zelf zijn tot op heden niet aangetroffen, zelfs niet bij zeer hoge ijzerconcentraties in het grondwater.

#### 4. Mobilisatie van puur product

Puur product dat opgesloten zit in poriën kan worden vrijgemaakt door luchtinjectie. De mobilisatie van het puur product kan leiden tot het ontstaan of vergroten van drijfzand in peilbuizen.

#### 5. Geotechnische effecten

Het onder druk injecteren van lucht in de bodem kan de stabiliteit en draagkracht van de bodem negatief beïnvloeden. Bij het ontwerp van het systeem moet met dit effect met name rekening worden gehouden als er bovengrondse of ondergrondse infrastructuur aanwezig is.

#### Kan door persluchtinjectie beschadiging aan gebouwen en infrastructuur ontstaan?

Uit onderzoek is gebleken dat door persluchtinjectie bij bepaalde drukken in de directe omgeving van luchtinjectiefilters (1 tot 3 m) de draagkracht van funderingspalen negatief kan worden beïnvloed. Dit wordt veroorzaakt doordat de korrelspanning van bodemdeeltjes wordt verlaagd door het onder druk injecteren van lucht. Uit de praktijk zijn er nog geen schadegevallen aan gebouwen bekend.

Als persluchtinjectie wordt toegepast in de nabijheid van oevers kan de oeverbekleding worden beschadigd door zanduitspoeling ten gevolge van de uittredende lucht. Dit kan een rol spelen bij waterdoorlatende oevers, die bijvoorbeeld met basaltstenen zijn bekleed.

Een nog niet onderzocht aspect is het effect van persluchtinjectie op veenlagen. In theorie bestaat het risico dat veen zal oxideren en inklinken als er onder het veen lucht wordt geïnjecteerd. Ook hier zijn geen praktijkgevallen van bekend.

### 1.3 Bovengrondse activiteiten voor aanvang

Hoewel een belangrijke eigenschap van in situ technieken is dat de verontreinigingen in situ zonder ontgraving worden behandeld, zijn er voor het aanbrengen van de in situ systemen bovengrondse activiteiten nodig. De volgende activiteiten kunnen worden onderscheiden:

#### *Aanbrengen van filters*

Voor het plaatsen van de luchtinjectiefilters zijn meestal machinale booropstellingen nodig. Deze machines hebben ruimte (breedte en hoogte) nodig voor de boring en het plaatsen van de filters.

#### *Leidingwerk*

Voor het installeren van leidingen naar de filters moeten leidingsleuven worden aangelegd. Deze leidingen worden op een diepte van 60 tot 80 cm beneden het maaiveld aangebracht.

#### *Installatie*

Het injecteren van lucht en het onttrekken van lucht vindt plaats met (olievrije) blowers of compressoren. Deze moeten worden aangebracht in geluidswerende opstelruimten. Eventueel is voor het zuiveren van onttrokken bodemlucht een luchtbehandelingssysteem nodig.

### 1.4 Met welke vergunningen moet rekening worden gehouden?

Voor het injecteren van lucht in de bodem is apparatuur nodig. Het plaatsen en het gebruik van deze apparatuur is geregeld onder de Wet Milieubeheer, vanwege de mogelijke geluidsoverlast die de pompen met zich kunnen meebrengen. Met name voor de pompen voor luchtinjectie is, door de benodigde energie voor de compressie van lucht, de overlast ten gevolge van de geluidsproductie een extra aandachtspunt. Afhankelijk van de ligging van de locatie en de tijdsduur van de sanering kan het bevoegd gezag (Gemeente) besluiten om de geluidsemisatie gedurende de periode van sanering te gedogen.

Indien een luchtzuiveringsinstallatie wordt aangebracht, kunnen aan de luchtemissies van deze luchtzuivering eisen worden gesteld in de vergunning van de Wet Milieubeheer. Daarbij wordt in de praktijk veelal verwezen naar de NER (Nederlandse Emissie Richtlijn).

## HOOFDSTUK 2

### WANNEER EN HOE KAN PERSLUCHTINJECTIE WORDEN TOEGEPAST?

#### 2.1 Toepasbaarheid van persluchtinjectie

De doelstelling van luchtinjectie is het, door de injectie van lucht onder de grondwaterspiegel, bewerkstelligen van de verwijdering van verontreinigingen uit de bodem door biologische en/of fysische processen. De toepasbaarheid van persluchtinjectie is daarom afhankelijk van:

1. de eigenschappen van de bodem waarin men persluchtinjectie wil uitvoeren;
2. chemische en fysische eigenschappen van de verontreiniging die men met persluchtinjectie wil verwijderen.

##### 2.1.1 Eigenschappen van de bodem

###### *Bodemtextuur*

De belangrijkste eigenschap van de bodem, die bepalend is voor het al dan niet kunnen toepassen van persluchtinjectie, is de doorlatendheid en de gelaagdheid van de bodem. Met de doorlatendheid van de bodem wordt doorgaans de verzadigde waterdoorlatendheid bedoeld, uitgedrukt in de K-factor. In tabel 1 wordt aangegeven bij welke textuur van de bodem (en bij welke range in doorlatendheid) persluchtinjectie zeker toepasbaar is (voor een definitie van de volume- en lijnaanpak, zie 2.2).

Tabel 1. Toepasbaarheid van persluchtinjectie gebaseerd op bodemtextuur en doorlatendheid.

bodemtextuur	K-factor (m/dag)	persluchtinjectie mogelijk	
		volumeaanpak	lijnaanpak
grind	> 100	ja	ja
zeer grof zand	10 - 100	ja	ja
grof zand	5 - 10	ja	ja
fijn zand	0,5 - 5	ja	ja
leem	< 0,5	(ja/)nee	ja
klei	< 0,5	(ja/)nee	ja
veen	< 0,5	(ja/)nee	ja

In klei- en veengronden en gronden met een hoog leemgehalte is persluchtinjectie in principe moeilijk of niet toepasbaar, omdat de luchtstroming in de bodem door de geringe doorlatendheid laag en moeilijk voorspelbaar is. Er zijn recentelijk echter wel voorbeeldprojecten uitgevoerd waar persluchtinjectie ook in deze bodems toepasbaar bleek te zijn (zie de lijst met NOBIS-projecten).

###### *Bodemgelaagdheid*

Nederland bestaat voor een groot gedeelte uit bodems die door sedimentatie zijn ontstaan. Dat betekent dat de bodems in Nederland veelal een sterke horizontale gelaagdheid vertonen. Gelaagdheid in bodems hoeft geen belemmering te vormen voor het uitvoeren van persluchtinjectie. Wanneer er echter sprake is van een bodemlaag die slecht doorlatend is en die zich boven het te behandelen gebied bevindt, bestaat de kans dat lucht zich onder deze laag ophoopt. De lucht zal zich vervolgens in horizontale richting onder deze laag gaan verspreiden en het grondwater inclusief verontreinigingen verdringen. Hierdoor bestaat de kans dat de verontreinigingen zich ongewenst horizontaal gaan verspreiden. Tevens wordt de bodem, die zich boven de ondoorlatende laag bevindt, niet behandeld.

Er zijn een aantal maatregelen te nemen om in dergelijke situaties ophoping van lucht te voorkomen. De slecht doorlatende bodemlaag kan worden geperforeerd met zandpalen of reliëf wells (peilbuizen onder de slecht doorlatende laag, die de lucht laten ontsnappen).

Het is zeer essentieel om een goed inzicht te hebben in de bodemopbouw. Indien twijfel bestaat over de geschiktheid van de bodem voor het toepassen van persluchtinjectie in de bodem, is het aan te bevelen om een korte pilottest uit te voeren.

#### *Organische stof in de bodem*

Organische verontreinigingen, zoals aromatische verbindingen of chloorhoudende koolwaterstoffen, kunnen adsorberen aan organische stof dat zich van nature in de bodem bevindt. Wanneer verwijdering van verontreinigingen plaatsvindt via persluchtinjectie in het grondwater of bodemlucht, zorgt organische stof via desorptie van deze verontreinigingen voor een zekere nalevering. Hoe hoger het organische stofgehalte, hoe groter de nalevering is van verontreinigingen. De nalevering resulteert in langere saneringstijden of hogere eindwaarden.

#### 2.1.2 *Eigenschappen van verontreinigingen*

Niet elke verontreiniging kan door persluchtinjectie worden verwijderd. De verontreinigingen dienen aan bepaalde criteria te voldoen. Deze criteria betreffen de volgende aspecten:

- structuur van de verontreiniging (met name de ketenlengte);
- vluchtigheid van de verontreiniging (uitgedrukt in de Henri-constante);
- biologische aërobe afbreekbaarheid;
- oplosbaarheid en adsorptie/desorptiekarakteristieken.

In tabel 2 wordt een overzicht gegeven van eigenschappen van enkele, veel voorkomende, verontreinigingen. In deze tabel wordt tevens aangegeven of deze verontreinigingen door middel van persluchtinjectie te verwijderen zijn. Een methode om verontreinigingen te karakteriseren op haalbaarheid van een in situ sanering is uitgewerkt in het NOBIS-project 95-2-02 (Verbetering van de positie van de in situ biodegradatievariant door toevoeging van imbibitie en drainage aan bestaande theorie).

#### **Moet er een pilottest worden uitgevoerd?**

Een pilottest geeft aan of en in welke zin eventueel problemen kunnen ontstaan wanneer persluchtinjectie op die specifieke locatie wordt uitgevoerd. Een pilottest is derhalve altijd aan te bevelen.

- Korte pilottests van een paar uur geven de volgende informatie:
  - 1) hoeveel lucht kan in de grond worden geïnjecteerd;
  - 2) vindt er significante luchtstratificatie plaats (horizontaal verspreiden van de lucht).
- Gemiddeld lange pilottests van 2 à 3 dagen geven extra informatie over:
  - 1) hoe is de lucht verdeeld in de verzadigde zone;
  - 2) welke vrachtverwijdering kan op korte termijn worden bereikt;
  - 3) zijn er negatieve invloeden van persluchtinjectie (bijvoorbeeld emissie van verontreinigingen naar de buitenlucht).
- Langdurige pilottests van enkele weken tot maanden geven inzicht in de omvang van de biologische processen. Deze processen hebben veelal een opstarttijd van 1 tot 2 weken nodig. Daarnaast kan bij verschillende injectieregimes (drukken van tijden en debieten) de effectiviteit van het luchtinjectiesysteem worden getest.

#### **Welk type verontreiniging kan met persluchtinjectie worden behandeld?**

Er zijn verschillende scenario's en verbindingen waarvoor persluchtinjectie geschikt kan zijn.

Brongebieden: Wanneer *vluchtige verbindingen* (evt. als een drijfslag) aanwezig zijn, kan een grote hoeveelheid vracht worden verwijderd door middel van persluchtinjectie als er goed water-luchtcontact is.

Opgeloste verbindingen: *Opgeloste verbindingen* met een dimensieloze Henri-constante tot boven de 0,01 kunnen bij direct water-luchtcontact worden verwijderd.

Biologische afbraak: *Aëroob afbreekbare verbindingen* kunnen worden afgebroken door de inbreng van lucht in de bodem.

Tabel 2. In situ reinigbaarheid van verschillende verontreinigingen.

verontreiniging	vluchtigheid \$	biologische afbreekbaarheid			oplosbaarheid	persluchtinjectie mogelijk?
		aëroob	cometa-bolisch	anaëroob		
<b>koolwaterstoffen</b>						
benzine (C <sub>4</sub> - C <sub>12</sub> )	+	+	-	+	ja	
kerosine (C <sub>6</sub> - C <sub>15</sub> )	±	+	-	+	ja	
diesel (C <sub>9</sub> - C <sub>26</sub> )	-	±	-	- *	ja	
huisbrandolie (C <sub>9</sub> - C <sub>24</sub> )	-	±	-	- *	ja	
smeeroliën (C <sub>15</sub> - C <sub>40</sub> )	-	-	-	-	nee **	
<b>aromatische verbindingen (BTEX)</b>						
benzeen	+	+	±	+	ja	
tolueen, ethylbenzeen, xylenen	+	+	+	+	ja	
<b>polycyclische aromatische koolwaterstoffen</b>						
licht (2-3 ringen)	±	+	-	± *	ja	
zwaar (4-5 ringen)	-	-	-	- *	nee **	
<b>chloorhoudende koolwaterstoffen</b>						
PER, TRI, cis-chloorethenen	+	-	+	+	ja	
chloorbenzeen	+	+	-	+	ja	
pesticiden	-	±	-	-	nee **	
PCB	-	-	-	-	nee **	
<b>overige verbindingen</b>						
MTBE	±	±	-	+	ja	

\* Oplosbaarheid van koolwaterstoffen kan worden verhoogd door gebruik van detergenten.

\*\* Gebruik makend van de huidige technieken is een succesvolle kortdurende sanering niet te garanderen.

\$ Persluchtinjectie dient te worden toegepast in combinatie met bodemluchtexttractie wanneer risico's ontstaan als gevolg van vervluchtiging van toxische verbindingen.

#### Is een drijfslag een probleem?

Vrij product, met name als een dunne drijfslag van een 5-10-tal centimeters, hoeft niet eerst te worden verwijderd. Persluchtinjectie in combinatie met bodemluchtexttractie voor het afvangen van de hoge concentraties in de onttrokken lucht, kunnen een dergelijke drijfslag, mits deze bestaat uit vluchtige verbindingen, goed verwijderen. Bij de aanwezigheid van een dikke drijfslag (> 30 cm) of relatief zwaar product (> C<sub>15</sub>) kan het wegpompen van het vrij product een efficiëntere aanpak zijn dan persluchtinjectie.

## 2.2 Toepassingsmogelijkheden van persluchtinjectie

In het algemeen wordt persluchtinjectie gebruikt binnen twee concepten te weten, een volumeaanpak en een lijnaanpak.

Met een volumeaanpak (zie fig. 2) wordt bedoeld het verwijderen van verontreinigingen in een bepaald volume bodem. In zekere zin wordt dit voornamelijk toegepast op brongebieden of gebieden met een relatief beperkte omvang waaruit verontreinigingen dienen te worden verwijderd. Pluimen van verontreinigingen, die veelal van grote omvang zijn, worden meestal niet door middel van de volumeaanpak behandeld vanwege de hoge kosten die een dergelijk grootschalig netwerk van injectiefilters met zich meebrengt.

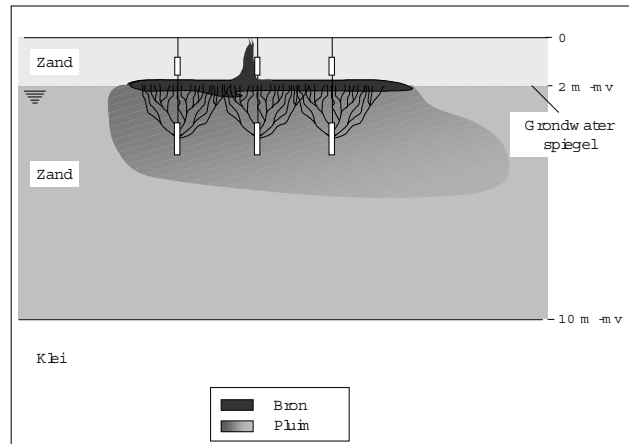


Fig. 2. Volumeaanpak.

De strategie van de lijnaanpak (zie fig. 3) leent zich dan ook meer voor pluimverontreinigingen; door het creëren van een actieve zone in de bodem met persluchtinjectiefilters wordt verdere verspreiding van de verontreiniging tegengegaan. De lijnaanpak kan derhalve worden gezien als een (tijdelijke) beheersmaatregel. Veelal wordt de term scherm of bioscherm gehanteerd voor deze systemen.

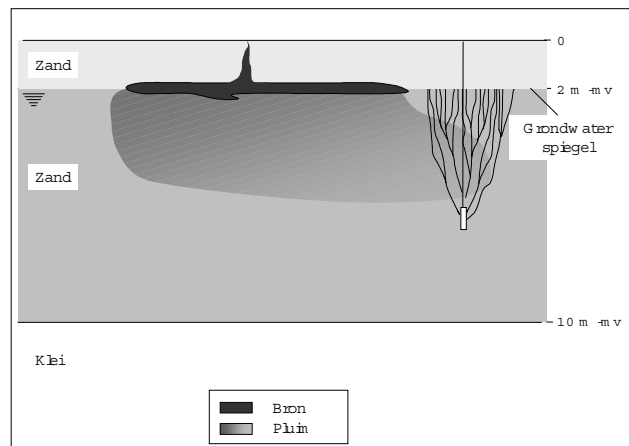


Fig. 3. Lijnaanpak.

Er kan ook voor worden gekozen om een brongebied te beheersen door middel van een lijnaanpak.

Zowel de volumeaanpak (een netwerk van injectiefilters die een bepaald oppervlak bestrijken) als de lijnaanpak (een raai van persluchtinjectiefilters die een luchtscherm vormen) kunnen op verschillende wijzen worden uitgevoerd. Er kan worden gekozen voor een intensieve vorm van beluchten, waarbij de nadruk wordt gelegd op het strippen van vluchtige verbindingen. Er kan tevens worden gekozen voor een minder extensieve vorm, waarbij de nadruk ligt op het stimuleren van de aërobe afbraak van de verontreinigingen. Beide vormen van aanpak vereisen een verschillende manier van ontwerp en dimensionering.

### **WELKE RESULTATEN KUNNEN MET PERSLUCHTINJECTIE WORDEN BEREIKT?**

De doelstelling van een sanering is het bewerkstelligen van een reductie van de negatieve effecten van verontreinigingen in het te behandelen gebied. De resultaten van een in situ sanering met persluchtinjectie kunnen worden beschreven aan de hand van de eindgehalten en de benodigde tijdsduur van de sanering.

De resultaten die kunnen worden behaald met persluchtinjectie zijn afhankelijk van:

- bodemeigenschappen (doorlatendheid, gelaagdheid, organische stofgehalte);
- eigenschappen van de verontreiniging (vluchtigheid en afbreekbaarheid);
- voorkomen van de verontreinigingen (opgelost of puur product).

#### **3.1 Eindgehalten**

Vluchtige en afbreekbare verontreinigingen (zoals bijvoorbeeld BTEX-aromaten, benzine) kunnen onder gunstige omstandigheden (goed doorlatende bodem) vrijwel volledig worden verwijderd. Verontreinigingen die alleen vluchtig zijn, moeten in direct contact komen met luchtkanalen. Bij het ontwerp zal dus moeten worden uitgegaan van de beluchtingsstraal. Omdat de dichtheid van luchtkanalen in verschillende bodemtypes kan variëren, zal het resultaat van de sanering variëren afhankelijk van de doorlatendheid van de bodem. Zo zal in een goed doorlatende bodem een hoge kanaaldichtheid kunnen worden verkregen en een hoog saneringsrendement, mits er een voldoende hoge dichtheid aan filters wordt geplaatst. Verontreinigingen, die alleen afbreekbaar zijn, kunnen ook met persluchtinjectie worden gesaneerd.

Indien puur product aanwezig is (brongebied), zal de dichtheid aan kanalen groot moeten zijn (dimensioneren op de beluchtingsstraal). Als de verontreinigingen alleen in opgeloste vorm aanwezig zijn (pluimgebied), kan gebruik worden gemaakt van het concept van de invloedsstraal. Afbreekbare olieverontreinigingen, zoals dieselolie en HBO, kunnen, indien aanwezig als puur product, voor 60 tot 90 % van hun initiële waarde worden gesaneerd. Grondwaterverontreinigingen, alleen opgeloste verontreinigingen, kunnen bij een goed gedimensioneerd systeem volledig worden verwijderd.

#### **3.2 Tijdsduur**

De tijd die nodig is voor de uitvoering van in situ saneringen met persluchtinjectie varieert voor grondverontreinigingen van 1 tot 4 jaar. Grondwaterverontreinigingen kunnen, wegens de geringe te verwijderen vracht, op een kortere termijn van 0,5 tot 2 jaar worden gesaneerd.

#### **3.3 Rebound effect**

Het is bekend van persluchtinjectie dat er na afloop van de luchtinjectie een zogenaamde rebound kan optreden. Rebound is het opnieuw stijgen van gehalten verontreinigingen in het grondwater na het stilzetten van de luchtinjectie. Er kunnen meerdere oorzaken zijn voor het optreden van de rebound. Een en ander wordt beschreven in 4.3.

## HOOFDSTUK 4

### HOE KAN DE WERKING VAN EEN PERSLUCHTINJECTIESYSTEEM WORDEN GECONTROLEERD?

Het verloop van een sanering door middel van persluchtinjectie dient op twee hoofdaspecten te worden gecontroleerd:

1. Worden er voldoende en met een acceptabele snelheid verontreinigingen verwijderd?
2. Werkt het persluchtinjectiesysteem (technisch) voldoende?

#### 4.1 Saneringsparameters

Om te controleren of er voldoende vracht wordt verwijderd door de behandeling met persluchtinjectie wordt het saneringsproces met name gemonitord op de concentraties van verontreinigingen in de verschillende bodemcompartimenten: grond, grondwater en bodemlucht. Wanneer in de bodemlucht concentraties zo hoog zijn dat er een kans bestaat voor onacceptabele emissie van vluchtige verbindingen, wordt persluchtinjectie in de regel gecombineerd met bodemluchtonttrekking.

In tabel 3 is een overzicht gegeven van de parameters die worden bepaald om een indruk te verkrijgen van het verloop van de sanering.

Tabel 3. Saneringsparameters en aspecten met betrekking tot monitoring.

parameter	doel	bemonsteringsmethode	analyse	bemonsteringsfrequentie (maanden)
<b>grond</b>				
verontreinigingen	kwantificering van verontreinigingen in grond	- boringen - biosondes	standaard laboratoriumanalyses	3 - 6
uitloging	kwantificering van risico van verspreiding van verontreinigingen	- boringen - biosondes	kolomexperimenten schudexperimenten	6
<b>grondwater</b>				
verontreinigingen	kwantificering van verontreinigingen in grondwater	- grondwatermonitorsfilters	standaard laboratoriumanalyses	3
<b>bodemlucht</b>				
verontreinigingen	kwantificering van verontreinigingen in bodemlucht	- bodemluchtmonitorsfilters - bodemluchtextractiefilters	standaard laboratoriumanalyses	1

#### 4.2 Performance parameters

Om te controleren of het persluchtinjectiesysteem technisch voldoet en of het systeem ook daadwerkelijk de condities in de bodem bewerkstelligt voor een goede verwijdering van de verontreinigingen, dienen een aantal parameters te worden gemonitord. Deze zogenaamde "performance" parameters zijn in tabel 4 weergegeven.





Tabel 4. Performance parameters.

parameter	doel	bemonsteringspunt	voorwaarde	frequentie
<b>installatie</b>				
druk en debiet	- werking van de compressor/blower - kwantificering van processen	injectiesysteem	druk en debiet moeten aan vooraf gestelde voorwaarden voldoen	continu
draaiuren	werking van de compressor/blower	compressor/blower	dient aan vooraf gestelde eisen te voldoen	continu
<b>bodem</b>				
zuurstof in grondwater	zuurstofverspreiding in grondwater	grondwatermonitorsfilter	concentratie opgelost zuurstof : > 2 - 3 mg/L	maandelijks
zuurstof in bodemlucht	zuurstofoverdracht-efficiëntie	bodemluchtmonitorsfilters	zuurstofgehalte > 5 vol. %	maandelijks
nutriënten in grondwater	controle van de verspreiding van nutriënten	grondwatermonitorsfilter	N > 5 mg/L P > 0,5 mg/L	maandelijks
biologische activiteit geschat door respiratiemetingen	kwantificering van biologische activiteit	grondwatermonitorsfilter	biologische activiteit moet significant hoger zijn dan die in de niet-verontreinigde bodem	driemaandelijks

De zuurstofconcentraties in grondwater en bodemlucht en concentraties van nutriënten in het grondwater zijn parameters die met name belangrijk zijn wanneer persluchtinjectie wordt gebruikt om biologische activiteit te stimuleren. Respiratiemetingen worden uitgevoerd om de biologische afbraaksnelheid te bepalen in het veld. Na beluchting van het grondwater wordt het persluchtinjectiesysteem uitgezet. De afnamesnelheid van de zuurstofconcentratie in het grondwater en/of bodemlucht die hierop volgt kan worden gerelateerd aan de snelheid waarmee de verontreinigingen worden omgezet.

Er is een verscheidenheid aan software en hardware op de markt die aan de PLC (Programmable Logic Controller = het besturingssysteem van de persluchtinjectie) kan worden gekoppeld. Hierdoor is het mogelijk om continu verschillende parameters te meten en digitaal op te slaan.

**Waar moet op worden gelet bij het opstarten van een persluchtinjectiesysteem?**

- Voorafgaand aan het opstarten alle mogelijke bronnen van verticale lekstromen (peilbuizen, minifilters, ont-trekkingsfilters e.d.) afdichten.
- Druk in de injectieleidingen: de druk mag niet te hoog oplopen. Bij oplopende druk is er waarschijnlijk sprake van ophoping van lucht onder een slecht doorlatende laag.
- Debiet: de hoeveelheid lucht die per filter wordt geïnjecteerd in de bodem moet voldoen aan de vooraf gestelde eisen.
- Zuurstof: de zuurstof dient goed te worden verspreid.

Voor de directievoerende partij van een sanering is het wenselijk om in verband met verrekeningen van uren die een compressor of blower daadwerkelijk hebben gedraaid de draaiuren automatisch te laten registreren.

In Nederland draaien reeds een aantal persluchtinjectie/bodemluchtextractiesystemen, waarbij tevens druk, debiet en concentraties van verontreinigingen (totaal koolwaterstoffen), zuurstof en kooldioxide automatisch worden geregistreerd. Deze systemen zijn voorzien van een on-line verbinding, zodat van achter het bureau kan worden gecontroleerd of het systeem goed werkt.

Voorts kan de automatische registratie van zuurstof en kooldioxide uitstekend worden gebruikt voor het uitvoeren van respiratietests.

#### 4.3 Rebound

Rebound is een term die wordt gebruikt voor het weer stijgen van concentraties verontreinigingen in grondwater en bodemlucht nadat het saneringssysteem voor een bepaalde periode is stilgezet. Oorzaken van rebound zijn veelal gelegen in niet-evenwicht omstandigheden tijdens de luchtinjectie en het preferent doorstromen van peilbuizen en andere monitoringssystemen in de bodem.

##### *Niet-evenwichtsprocessen*

Bodemprocessen die zich als gevolg van persluchtinjectie en bodemluchtextractie afspelen zijn merendeels niet-evenwichtsprocessen. Wanneer bijvoorbeeld tijdens een continue bodemluchtonttrekking geen verontreinigingen in de onttrokken lucht worden gemeten, kan het zo zijn dat na het stilzetten van de onttrekking als gevolg van langzame desorptie en/of diffusie uit niet-doorstroomde poriën in de bodem, verontreinigingen weer accumuleren. Dit verschijnsel doet zich met name voor als er restverontreinigingen in de vorm van puur product zijn achtergebleven.

##### *Kwaliteit van peilbuizen als monitoringmiddel*

Het stijgen van de gehalten verontreinigingen in grondwater na het stilzetten van het systeem kan te maken hebben met de kwaliteit van de monitoringfilters. Wanneer een luchtkanaal het filter van een peilbuis en het filtergrind, dat als omstorting van peilbuizen wordt gebruikt, doorsnijdt, wordt het water in en rondom de peilbuis preferent belucht. Na bemonstering van de peilbuis blijkt dat de concentraties aan vluchtige verbindingen laag zijn, terwijl in de omgeving van de peilbuis nog hoge concentraties aanwezig zijn. Na het stilzetten van het systeem kan er een rebound in de peilbuizen optreden. Dit kan met name voorkomen als er restverontreinigingen in de grond zijn achtergebleven.

##### **Waar moet op worden gelet bij het afsluiten van een persluchtinjectiesysteem?**

Bij het afsluiten van een persluchtinjectiesysteem is het belangrijk om rebound effecten te onderzoeken. Hiertoe dienen minimaal twee maanden na het stilzetten van het systeem opnieuw concentraties van de betreffende verontreinigingen in het grondwater en bodemlucht te worden gemeten.

Een maatregel om de preferente doorstroming van het gebied in en rondom de peilbuizen te voorkomen is het goed afdoppen van de peilbuizen, zodat de lucht niet naar het maaiveld kan ontsnappen en er geen preferente beluchting van het water in de peilbuizen kan plaatsvinden. Voorts is het aan te bevelen om voorafgaand aan de monsternamen de peilbuizen zeer goed door te pompen, zodat men er zeker van is dat het water in de peilbuis en in de omstorting ververst is met omgevingswater.

Voor monitoring tijdens de persluchtinjectie kan ook gebruik worden gemaakt van kleine discrete filters (lengte 20 cm, diameter 2,5 cm). Deze filters zijn met een PE-bemonsteringsslang aan het maaiveld te bemonsteren. De voordelen hiervan zijn de geringere kans van preferent beluchten vanwege de geringere filterlengte en het kleine doorpompvolume. Een nadeel kan zijn dat de representativiteit kleiner is vanwege de geringe filterlengte.

Voor het meten van een rebound effect wordt aangeraden minimaal twee maanden nadat het systeem in zijn geheel is stilgezet opnieuw een monitoring uit te voeren.

### **WAT ZIJN DE RISICO'S BIJ UITVOERING VAN IN SITU SANERING MET PERSLUCHTINJECTIE EN HOE HIERMEE OM TE GAAN?**

#### **5.1 Onzekerheden bij in situ sanering**

Het omgaan met onzekerheden is een belangrijk aspect van in situ saneren. Op dit moment, en naar verwachting ook niet in de nabije toekomst, is er niet voldoende kennis aanwezig om op basis van een bodemonderzoek een kosteneffectief en full-scale in situ saneringssysteem te ontwerpen en een eindresultaat te garanderen.

Het uitvoeren van in situ saneringen brengt onzekerheden met zich mee. Hoewel met name bedrijven gewend zijn aan het nemen van risico's, brengt de uitvoering van in situ saneringen bepaalde onzekerheden met zich mee, die op voorhand niet volledig in te schatten zijn. Ondanks alle inspanningen die worden gedaan om verontreinigingen en de bodem te karakteriseren, blijkt in de praktijk dat zich toch onverwachte situaties kunnen voordoen. Vanwege de aard van het gedrag van verontreinigingen in de bodem, heeft deze onzekerheid met name effect op de tijdsduur die nodig is om het van tevoren vastgestelde einddoel te behalen. Deze tijdsduur kan tot op zekere hoogte met modellen en praktijkervaring worden ingeschat, echter afwijkingen zijn niet uit te sluiten.

De onzekerheden hebben invloed op de kosten die moeten worden gemaakt voor het aanleggen en bedrijfsvoeren van de sanering. Een groot deel van de kosten van in situ saneringen zijn de jaarlijkse kosten voor het in stand houden van het systeem en de monitoring.

In vergelijking met andere saneringsvarianten wordt echter vaak over het hoofd gezien dat een sanering door ontgraving of beheersing met civieltechnische middelen ook risico's met zich meebrengt. Zo is komen vast te staan dat de omvang van de verontreinigingen bij een ontgraving gemiddeld 30 % afwijkt van de op basis van het vooronderzoek ingeschatte hoeveelheden, hetgeen direct zal leiden tot een toename van de kosten met circa 30 %. Deze kosten wijken niet af van de mogelijke afwijkingen van kosten bij in situ saneringen. Ook civieltechnische constructies voor het isoleren van verontreinigingen blijken niet altijd probleemloos te functioneren.

De onzekerheden die gepaard gaan met het inschatten van de effectiviteit en de kosten van in situ saneringen zijn onder te verdelen in:

- onzekerheden met betrekking tot de bodem en de aard en het gedrag van de verontreiniging;
- onzekerheden met betrekking tot ontwerp en uitvoering van de techniek.

In dit hoofdstuk worden deze aspecten, die gepaard gaan met de uitvoering van een in situ sanering met persluchtinjectie, kort besproken. In de kaders staan tekortkomingen bij de verschillende projectfasen aangegeven, die zijn voortgekomen uit de door NOBIS georganiseerde 'Bloopersworkshop', waarin de tekortkomingen van in situ saneringen zijn geëvalueerd.

#### **5.2 Bodem en verontreiniging**

Het bepalen van de aard van verontreinigingen en de bodemgesteldheid kan tot op zekere hoogte met behulp van bodemonderzoek worden vastgesteld. We krijgen echter nooit met zekerheid te zien hoe en waar de verontreinigingen zich bevinden. Alleen bij het ontgraven van verontreinigingen kan de bodem en de verontreiniging direct worden aanschouwd.

Het is desalniettemin gewenst om, indien wordt overwogen om over te gaan tot uitvoering van een in situ sanering, kwalitatief goede informatie te hebben over de aard (goed of slecht doorlatend, organische stofgehalte) en samenstelling (gelaagdheid) van de bodem en de aard (puur product, drijf-laag) en omvang van de verontreinigingen. Een gedegen bodemonderzoek kan onverwachte complicaties bij de uitvoering van de in situ sanering voorkomen.

#### Tekortkomingen vooronderzoek

- Onbekende bron met puur product aanwezig in de bodem (veel voorkomend probleem bij chemische wasserijen).
- Onverwachte ligging van puur product boven, onder of in klei- en leemlagen.
- Geen rekening gehouden met historische fluctuatie van grondwater.
- Sterke gelaagdheid maakt persluchtinjectie onmogelijk.
- Op basis van handboringen veronderstelde homogene bodem blijkt in de praktijk toch heterogeen.

Specifiek voor persluchtinjectie is het voorkomen van storende lagen in de bodem van grote invloed op de verdeling van lucht in de bodem. Niet alleen de gegevens van het bodemonderzoek, maar ook inzicht in de ontstaanswijze van de bodem op het terrein is van groot belang.

### 5.3 Ontwerp en uitvoering

Een flexibel ontwerp van een in situ systeem met voldoende regel- en stuurmogelijkheden maakt het mogelijk om tijdens de sanering optimalisaties uit te voeren. Het is van essentieel belang om tijdens het ontwerp rekening te houden met voldoende controle- en stuurmogelijkheden (afsluiters, debiet- en drukmeters) om het systeem te monitoren en bij te kunnen regelen.

Flexibel kan ook betekenen *overdimensioneren*. Het is uit kosten oogpunt verstandiger om licht over te dimensioneren door een paar extra luchtinjectiefilters te plaatsen, dan om kritisch op de grens van de invloedsstraal te dimensioneren. Als blijkt dat de invloedsstraal om wat voor reden dan ook te beperkt is, dan moet door het plaatsen van filters en leidingwerk de bovengrondse infrastructuur weer worden verstoord.

#### Tekortkomingen uitvoering

- Persluchtinjectiefilters in elkaars invloedsgebied, waardoor lekstroming via de luchtinjectiefilters ontstaat.
- Kortsluitstroming van lucht via peilbuizen.
- Een tekort aan flexibiliteit in de besturing van het systeem (te veel clustering van filters).
- Te diepe plaatsing van persluchtinjectiefilters (10 tot 15 m beneden het te behandelen brongebied).
- Geen of slechte interpretatie en bijsturing van sanering op basis van monitoringsgegevens.

Tijdens de uitvoering van een in situ sanering kan het voorkomen dat het saneringssysteem op een bepaald deel van het te saneren terrein moet worden aangepast. Ondanks alle voorzorgsmaatregelen en een flexibel ontwerp blijkt in de praktijk immers dat in situ systemen zich niet altijd gedragen zoals verwacht. Een zogenaamde 'mid course correction', waarbij bijvoorbeeld aanvullend filters moeten worden geplaatst, kan noodzakelijk zijn.

### 5.4 Aanbesteding

Bij het aanbesteden van in situ saneringsprojecten zijn er in zijn algemeenheid twee mogelijkheden van aanbesteden:

#### 1. Inspanningsverplichting

De aannemer moet een afgesproken inspanning leveren, zoals het plaatsen van een systeem en het gedurende een bepaalde periode in stand houden van een systeem. De risico's voor het niet behalen van de saneringsdoelstelling binnen de termijnen liggen bij de opdrachtgever. Het bestek of de werkschrijving wordt gedetailleerd uitgewerkt door de bestekschrijver.

## 2. *Resultaatsverplichting*

De aannemer moet de sanering uitvoeren en een bepaalde doelstelling behalen. De aannemer zal daarbij in zekere mate moeten worden vrijgelaten in zijn keuze voor het saneringssysteem. Het risico voor het niet behalen van de doelstelling van de sanering ligt bij de aannemer. De aannemer moet in vergelijking met een bestek met een inspanningsverplichting hogere initiële kosten maken voor het ontwerp van het systeem, waarop hij zijn inschrijving kan baseren.

Er bestaat een tendens om werkschrijvingen en bestekken meer op basis van een resultaatsverplichting op te stellen. Dit brengt met zich mee dat de aannemers van het werk moeten worden voorzien van alle benodigde informatie en meer initiële kosten zullen maken. Daarnaast zal de aannemer een hoger risico lopen bij de uitvoering van het project en dit risico tot uiting brengen in de inschrijving.

Bij het werken met een resultaatsverplichting wordt het gebruik van een voorselectie of een shortlist van aannemers, die aantoonbare ervaring hebben in de uitvoering van in situ saneringsprojecten, sterk aanbevolen. Indien hiervan geen gebruik wordt gemaakt, bestaat het risico dat een ondeskundige aannemer de aan de uitvoering van in situ sanering gekoppelde risico's niet kan inschatten en het werk op zich neemt, met alle mogelijke gevolgen vandien.

### 5.5 **Communicatie**

Omdat de uitvoering van een in situ sanering gepaard gaat met onzekerheden is de communicatie tussen ontwerper, uitvoerder en opdrachtgever van groot belang. De praktijk toont aan dat er vaak te weinig evaluatie en terugkoppeling van resultaten is om de sanering op een efficiënte wijze uit te voeren en bij te sturen. In combinatie met een gebrek aan kennis en ervaring bij het uitvoeren van in situ saneringen bij opdrachtgevers leidt dit onvermijdelijk tot misverstanden. De flexibiliteit, die nodig is om een in situ sanering succesvol tot een einde te brengen, is dan vaak ook niet meer aanwezig.

Deze misverstanden kunnen eenvoudig worden voorkomen door voorafgaand aan de sanering de onzekerheden en risico's binnen het projectteam duidelijk te communiceren. Er dient een duidelijk programma van eisen te zijn en de uitgangspunten en de doelstelling van de sanering moeten helder zijn. Na de start van de sanering dient een periodiek overleg (bijvoorbeeld driemaandelijks) te worden georganiseerd, waarin terugkoppeling kan plaatsvinden. De frequentie kan in een later stadium teruggebracht worden.

## HOOFDSTUK 6

### WAT ZIJN DE KOSTEN?

#### 6.1 Algemeen

De kosten van een persluchtinjectiesystemen zijn afhankelijk van de hoeveelheid grond en grondwater die moet worden behandeld. De kosten zijn echter niet lineair met de hoeveelheid te behandelen grond.

In het algemeen zijn de kosten van een in situ sanering via persluchtinjectie (eventueel aangevuld met een bodemluchtonttrekking) in een ondiepe watervoerende laag in vergelijking tot ontgraven goedkoper bij een te behandelen bodemvolume van 500 - 1.000 m<sup>3</sup>. Grotere hoeveelheden (> 5.000 m<sup>3</sup>) kunnen worden behandeld voor  $f$  100,00 -  $f$  200,00/m<sup>3</sup>.

#### 6.2 Case: Tweejarige sanering van een drijfslag bij een benzinstation

Tabel 5 geeft de kosten van een typische twee jaar durende persluchtinjectie/BLE-bronsanering van een drijfslag bij een tankstation. Het verontreinigde volume is ongeveer 1.000 m<sup>3</sup>. De onttrokken bodemlucht wordt biologisch behandeld. De instandhoudings- en monitoringskosten zijn uitgedrukt als percentage van de totale kosten gedurende twee jaar sanering.

Tabel 5. Kosten voor een twee jaar durende bronbehandeling met persluchtinjectie en BLE.

post	kosten in $f$	% van totale kosten
site karakterisering	20.000 - 40.000	5 - 10
ontwerp	30.000	5 - 10
installatie	100.000 - 300.000	50
instandhouding (jaarlijks)	30.000 - 50.000	20
monitoring (jaarlijks)	30.000	15
totale kosten	270.000 - 500.000	

De installatie van het systeem is de grootste kostenpost. Instandhouding van het systeem (mensuren en energiekosten) en monitoringskosten bedragen ongeveer 1/3 van de totale kosten voor een tweejarige sanering. Het energieverbruik ligt op ongeveer 50 - 100 kWu/m<sup>3</sup> bodem.

Bij saneringen die langer dan twee jaar duren, zullen de instandhoudingskosten en monitoringskosten een substantieel aandeel van de totale saneringskosten vormen.

#### 6.3 Case: Beheersing door middel van bioscherm

In tabel 6 zijn de kosten weergegeven voor de uitvoering van een bioscherm met een lengte van circa 100 m en een diepte van circa 15 m.

Tabel 6. Kosten voor een beheersing door middel van een bioscherm.

post	kosten in <i>f</i>
site karakterisering	20.000 - 40.000
ontwerp	30.000
installatie	100.000 - 150.000
instandhouding (jaarlijks)	5.000
monitoring (jaarlijks)	15.000
gekapitaliseerde kosten (30 jaar)	350.000

De kosten voor installatie is in de regel de grootste kostenpost. Wanneer eenmaal het systeem is geïnstalleerd, is het onderhoud gering. De gemiddelde monitoringskosten nemen in het algemeen af in de loop van de jaren.



## LIJST MET NOBIS-PROJECTEN

NOBIS-projecten waarin persluchtinjectie een belangrijke rol speelt:

- 95-1-05 In situ sanering van kleibodem (HEISA)
- 95-1-13 Biosparging en Bioventing
- 95-1-16 In situ sanering van gelaagde en slecht doorlatende gronden
- 95-2-02 Verbetering van de positie van de in situ biodegradatievariant door toevoeging van imbibitie en drainage aan bestaande theorie
- 96-1-03 Biologisch hekwerk op het terrein van Shell Nederland Raffinaderij
- 96-910 Mogelijke toepassing van hydraulische fracturing bij in situ saneringen
- 98-1-30 Onderzoek naar het saneringsrendement en meerwaarde van diffusiespargen ten opzichte van microspargen op in situ biodegradatie van kerosine op de vliegbasis Soesterberg