

NOBIS 96-2-08

Definitiestudie naar de extensieve reiniging van
grond verontreinigd met PAK en/of minerale olie in
civieltechnische werken.

ir. H.C. van Liere (TNO-MEP)
ing. J.M. Gadella (Service Centrum Grondreiniging)
dr. A. Honders (Service Centrum Grondreiniging)
ir. P.I.M. Vis (Ecotechniek Soil Remediation)

april 1999

Gouda, CUR/NOBIS

Titel rapport

Definitiestudie naar de extensieve reiniging van grond verontreinigd met PAK en/of minerale olie in civieltechnische werken

CUR/NOBIS rapportnummer

96-2-08

Project rapportnummer

96-2-08

Auteur(s)

ir. H.C. van Liere
ing. J.M. Gadella
dr. A. Honders
ir. P.I.M. Vis

Aantal bladzijden

Rapport: 34
Bijlagen: 4

Uitvoerende organisatie(s) (Consortium)

TNO-MEP (ir. H.C. van Liere, 055-5493925)
Service Centrum Grondreiniging (dr. A. Honders, 030-2883954)
Ecotechniek Soil Remediation (ir. P.I.M. Vis, 0346-557700)

Uitgever

CUR/NOBIS, Gouda

Samenvatting

In het kader van het NOBIS-programma is een definitiestudie uitgevoerd naar de haalbaarheid van een biologische extensieve reiniging van met PAK en/of minerale olie verontreinigde grond geïntegreerd in een civieltechnisch werk. Uit deze studie volgt dat een dergelijke saneringsvariant mogelijk is indien aan een aantal (bio)technologische randvoorwaarden wordt voldaan. Het concept is doorgerekend voor de aanleg van een geluidswal in de vorm van een bio-pile.

Trefwoorden**Gecontroleerde termen:**

PAK, olie, biologische afbraak

Vrije trefwoorden:

geluidswal

Titel project

Definitiestudie naar de extensieve reiniging van grond verontreinigd met PAK en/of minerale olie in civieltechnische werken

Projectleiding

Ecotechniek Soil Remediation

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

Report title

Feasibility study of the extensive treatment of soil contaminated with PAH and/of mineral oil in civil constructions.

CUR/NOBIS report number

96-2-08

Project report number

96-2-08

Author(s)

ir. H.C. van Liere
ing. J.M. Gadella
dr. A. Honders

Number of pages

Report: 34

Appendices: 4

ir. P.I.M. Vis

Executive organisation(s)

TNO-MEP (ir. H.C. van Liere, 055-5493925)
Service Centrum Grondreining (dr. A. Honders, 030-2883954)
Ecotechniek Soil Remediation (ir. P.I.M. Vis, 0346-557700)

Publisher

CUR/NOBIS, Gouda

Abstract

A feasibility study is carried out to the integration of a biological extensive treatment of soil, contaminated with PAH and/or mineral oil, in a civil construction. The results show that this application could be possible if some (bio)technological prelimiting conditions are fulfilled. A noise-protection dam constructed as a bio-pile has been calculated.

Keywords**Controlled terms:**

PAH, mineral oil (TPH), biodegradation

Uncontrolled terms:

noise-protection dam

Project title

Feasibility study of the extensive treatment of soil contaminated with PAH and/of mineral oil in civil constructions.

Projectmanagement

Ecotechniek Soil Remediation

This report can be obtained by:

CUR/NOBIS, PO Box 420, 2800 AK Gouda, The Netherlands
Dutch Research Programme In-Situ Bioremediation (NOBIS)

Inhoudsopgave

Samenvatting	vi
Summery	viii
1. Inleiding.....	1
2. 1 ^e inschatting marktpotentie.....	3
2.1. Aanbod van grond.....	3
2.2. Vraag naar grond.....	3
2.3. Samenvatting.....	4
3. Technische voorzieningen	5
3.1. Toepassingseisen voor hergebruik.....	5
3.1.1. Technische voorzieningen m.b.t. het risico voor het milieu	6
3.1.2. Technische voorzieningen l.v.m. het biologische afbraakproces	7
3.2. Samenvatting.....	8
4. Bio(techno)logische voorzieningen	10
4.1. Inventarisatie bio(techno)logische voorzieningen grondreiniging	10
4.2. Samenvatting.....	14
5. Marktpotentie gespecificeerd naar type bodem	16
5.1. Reinigingsrendementen	16
5.2. Marktpotentie extensieve grondreiniging	21
5.3. Samenvatting.....	24
6. Risico's.....	25
6.1. Risico-evaluatie reinigingsrendementen	25
6.2. Risico-evaluatie omgeving (tijdens reiniging).....	25
6.3. Risico-evaluatie civieltechnisch werk: stabiliteit (tijdens en na constructie).....	25
7. Ontwerpvoorbeeld civieltechnisch werk voor extensieve reiniging	27
7.1. Minimalisering technische voorzieningen	27
7.2. Ontwerp geluidswal.....	27
7.3. Samenvatting.....	29

8.	Conclusie	30
9.	Vervolgtraject	31
Literatuur	32
BIJLAGE A	OVERZICHTSTABEL PAK-afbraak	
BIJLAGE B	ONTWERP VAN EEN GELUIDSWAL	

Samenvatting

Op basis van een uitgevoerde marktverkenning is gebleken dat jaarlijks grote hoeveelheden grond aangemeld worden die licht tot matig verontreinigd zijn met polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAK). Afgraven en thermisch of anderszins reinigen van deze partijen grond kan een dermate zware financiële belasting vormen hetgeen kan resulteren in stagnatie van de ontwikkeling van locaties die licht tot matig zijn verontreinigd met PAK. Op labschaal is aangetoond dat micro-organismen in staat zijn grond verontreinigd met PAK te reinigen tot beneden de grenswaarde voor hergebruik. Toepassing van deze bioprocessen vindt plaats in landfarmachtige constructies. Civieltechnische werken kunnen wellicht met een aantal additionele voorzieningen als biopile dienen waardoor de biologische reiniging van matig verontreinigde grond in het werk kan plaats vinden. Uitgaande van de huidige biologische ex-situ reinigingstechnieken mogen de kosten voor de inrichting en onderhoud van een dergelijk civieltechnisch werk maximaal fl 50,- per ton bedragen.

In de onderhavige definitiestudie is de haalbaarheid van deze vorm van extensieve reiniging van grond verontreinigd met PAK en/of minerale olie geïntegreerd in een civieltechnisch werk onderzocht.

In de definitiestudie zijn de volgende aspecten onderzocht:

- literatuuronderzoek naar het verwijderingsrendement van PAK door het toepassen van biologische reinigingsprocessen
- inventarisatie van de benodigde technische en biotechnologische voorzieningen
- marktpotentie
- toepassingsgebieden
- kosten voor aanleg geluidswal in de vorm van een biopile

Aan de hand van het uitgevoerde literatuuronderzoek volgt dat zowel PAK als minerale olie bij aanwezigheid van juiste (milieu)condities vergaand kan worden afgebroken in met PAK en/of olie verontreinigde grond.

Biotechnologische aspecten die belangrijk zijn voor het afbraakproces zijn de aanwezigheid van de juiste micro-organismen, de aanwezigheid van zuurstof, de juiste omgevingsfactoren en de biobeschikbaarheid van de verontreiniging. Het toevoegen van specifieke micro-organismen en het toevoegen van middelen ter verhoging van de biobeschikbaarheid zijn uit economisch oogpunt niet haalbaar voor de beoogde toepassing. De aanwezigheid van zuurstof wordt gerealiseerd door het aanbrengen van beluchtingsdrains.

Op basis van de haalbare reinigingsrendementen zijn selectiecriteria opgesteld aan de hand waarvan door het SCG een marktonderzoek is verricht. Uit dit marktonderzoek volgt dat er jaarlijks circa een 0,5 miljoen ton matig verontreinigde grond vrijkomt in Nederland die in principe in aanmerking komt voor de beoogde toepassing.

Er is op dit moment meer vraag naar grond dan er aangeboden wordt en dat zal in de toekomst nog meer toenemen. De markt voor matig verontreinigde grond lijkt met name in toepassingen als geluidswallen, bovenafdichtingen van stortplaatsen of als landschapsarchitectonische onderdelen te liggen. Toeslagmaterialen en technische voorzieningen die nodig zijn voor de extensieve reiniging vormen hier geen belemmering voor de toepassing. Dit in tegenstelling tot grond die ingezet wordt als constructief ophoogmateriaal. Deze secundaire bouwstof moet aan striktere civieltechnische eisen voldoen. Alleen dan kan matig verontreinigde grond in toepassingen als ophogingen van wegen en terreinen extensief gereinigd worden.

Het concept om grond extensief te reinigen in een civieltechnisch werk is doorgerekend voor de aanleg van een geluidswal. Vooralsnog lijkt dit de meest haalbare optie zowel vanuit financieel oogpunt als op basis van wet- en regelgeving.

De minimale kosten voor de aanleg van een geluidswal in de vorm van een biopile bedragen circa fl 10,- per ton. De geluidswal is hierbij voorzien van een folie als onderafdichting, een beluchtingsunit en waterzuivering voor de reiniging van vrijkomend percolatiewater. De jaarlijkse kosten voor het instant houden van de voorzieningen en de monitoring bedragen circa fl. 9,- per ton per jaar.

Aanvullend onderzoek in de vorm van een demonstratieproject is noodzakelijk om het functioneren van het concept en de financiële haalbaarheid in de praktijk te verifiëren. Daarnaast is aanvullend onderzoek gewenst om een matrix op te stellen voor welke type grond en herkomst van de PAK-verontreiniging het concept in de praktijk kan worden toegepast.

Summery

Market research has shown that yearly large quantities of soil, which are contaminated with polyaromatic hydrocarbons (PAH), are reported to the Dutch authorities. Excavation and thermal treatment of these contaminated soils can result in high remediation costs. This can result in a stagnation of the development of these contaminated sites.

Laboratory research has demonstrated that with the use of microorganisms (bacteria and fungi) soil contaminated with PAH can be purified to levels that are below the target value for reuse as category 1 soil. Application of these biological processes takes places in landfarms or bio-piles. Civil constructions (like a noise-protection dam or an earth fill) could possibly be constructed, with the use of additional supplies, as a bio-pile. In this way the purification of the soil can take place in the civil construction itself.

In this feasibility study the extensive treatment of soil contaminated with PAH and/of mineral oil integrated in a civil construction has been investigated. This study includes the following items:

- literature research at the biodegradation of PAH in contaminated soils
- list of the necessarily technical and biotechnological supplies
- market potential
- field of application
- costs for the construction of a noise-protection dam constructed as a bio-pile

Literature research show that soil contaminated with PAH and/or mineral oil can be purified with biological treatment methods. Biotechnological aspects that are relevant for the biological degradation are the presence of microorganisms that can degrade PAH, the presence of oxygen, environmental conditions and the bioavailability of the contamination. The addition of specific microorganisms and/or (bio)surfactants to enhance the bioavailability is not feasible due to the high costs for this application. The addition of oxygen is performed with the use aeration drains.

Market research shows that yearly approximately 500.000 ton of contaminated soil is treated with conventional methods that also can possibly be treated with this new application.

At this moment the demand for category 1 soil in the Netherlands is higher than the supply of category 1 soil. The demand for category 1 soil will even increase in the near future. The field of application for the use of biological integrated processes in civil construction works are for instance the construction of noise-protection dams and the top sealing of landfill sites. Admixtures and technical supplies in the bio-piles do not interfere these applications.

The construction of noise-protection dam constructed as a bio-pile has been calculated. The minimum costs for the construction of a noise-protection dam as a bio-pile are Dfl 10,- per ton of soil. The noise protection dam consists of a LDPE film as bottom sealing, aeration drains and aeration unit, and a water treatment system to treat percolation water. The yearly cost for maintenance of the technical supplies and the monitoring of the degradation process are approx. Dfl 9,- per ton of soil per year.

Further research is necessary to verify the performance and the financial feasibility for field-application.

1. Inleiding

In een voor dit project door het SCG uitgevoerde marktverkenning is gebleken dat er in Nederland jaarlijks grote hoeveelheden verontreinigde grond vrijkomt. SCG schat dat op jaarbasis een 1,5 miljoen ton matig verontreinigde grond beschikbaar komt, die voor hergebruik niet aan de gestelde eisen voor polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAK-) en/of minerale olieconcentraties voldoet. Om deze grond toch te kunnen hergebruiken, zal de grond gereinigd moeten worden. Voor reinigingsprocessen dient er zekerheid te bestaan omtrent de haalbaarheid (binnen een gestelde tijd en binnen een bepaald budget) van de verlaging naar een acceptabele PAK- en/of minerale olieconcentratie, d.w.z. onder de grenswaarde. Afgraven en thermisch of anderszins fysisch/chemisch reinigen van deze partijen grond betekent over het algemeen een zware financiële belasting voor de betrokken probleembezitters (voor kostenverwerkingsoverzicht zie hieronder). Vandaar dat er in dit werkplan een aanzet gegeven wordt tot biologische in-situ reiniging en hergebruik van matig verontreinigde grond, die afhankelijk van de verontreinigingsconcentratie tussen 25 en 50 f/ton moet gaan kosten (zie benchmarks).

Intermezzo Kostenverwerkingsoverzicht:

Verwerking van grond	Kosten (f/ton)
Reinigen/storten:	50-150
Bio-commercieel:	50-70
Bio-operationeel:	30-50
Benchmark moeilijk reinigbare grond:	50
Benchmark makkelijk reinigbare grond:	25
Hergebruik (klei):	10
Hergebruik (zand):	5

- *Makkelijk reinigbare grond:*

Grond (meestal zand) dat op dit moment al biologisch (bio-operationeel/commercieel) te reinigen is. Deze grond met een concentratie van 5*G (G = grenswaarde) moet binnen 2 jaar tijd gereduceerd worden tot onder de grenswaarde. De totale kosten van deze bodemsaneringstechniek mogen maximaal 25 f/ton bedragen.

- *Moeilijk reinigbare grond:*

Moeilijk reinigbare grond is gedefinieerd als de rest van de grond dat op dit moment thermisch gereinigd wordt of gestort wordt. Tot deze grond behoort zandgrond met een concentratie van meer dan 5*G en kleigrond met een concentratie van minder dan 5*G, welke binnen 5 jaar tijd gereduceerd moet kunnen worden tot onder de grenswaarde. De totale kosten van deze bodemsaneringstechniek mogen maximaal 50 f/ton bedragen.

Op laboratoriumschaal is al aangetoond dat grond, verontreinigd met PAK en/of minerale olie, met behulp van (witrot)schimmels en bacteriën, gereinigd kan worden. Toepassing van deze bioprocessen in landfarm en biopile/lysimeter-constructies komt daarmee binnen bereik. Civieltechnische werken kunnen wellicht met een aantal additionele voorzieningen als biopile/lysimeter dienen, waardoor in-situ reiniging van verontreinigde grond in het werk zelf zou kunnen plaatsvinden. Bovendien is er in Nederland behoefte aan grond voor het aanleggen van civieltechnische werken, zoals het ophogen van terreinen, geluidswallen, taluds, spoorbanen, havendemping etc. Milieuhygiënisch verantwoorde toepassing van biologische reiniging van matig verontreinigde grond met PAK en/of minerale olie in dergelijke civieltechnische werken is aantrekkelijk, omdat daarmee twee vliegen in één klap kunnen worden geslagen (reiniging grond en constructie civieltechnische werk).

In dit project is onderzocht wat de haalbaarheid is van extensieve (biologische) reiniging van grond, verontreinigd met PAK en/of minerale olie, in civieltechnische werken.

In deze haalbaarheidsstudie is gestructureerd informatie verzameld om de toepassing van civieltechnische werken als reinigingsvariant te kunnen beoordelen. In een vervolgfase wordt besloten welke varianten nader onderzocht zullen worden.

Het rapport is als volgt opgebouwd. Hoofdstuk 1 is de inleiding. Hoofdstuk 2 geeft een eerste inschatting van de marktpotentie voor extensieve reiniging van verontreinigde grond met PAK en/of minerale olie (vraag en aanbod). Hoofdstuk 3 bevat een overzicht van de technische voorzieningen die nodig zijn voor de extensieve reiniging in civieltechnische werken. Hoofdstuk 4 gaat in op de bio(techno)logische voorzieningen die een rol spelen bij deze manier van grondreiniging. Hoofdstuk 5 richt zich op de marktpotentie verkregen op basis van reinigingsrendementen. Hoofdstuk 6 geeft kort weer wat de risico's zijn wanneer dergelijke civieltechnische constructies toegepast worden (risico-evaluatie). Hoofdstuk 7 geeft een uitwerking van een civieltechnisch werk voor extensieve reiniging. Hoofdstuk 8 bevat de conclusies. In hoofdstuk 9 wordt aangegeven wat in een vervolgtraject nader onderzocht dient moet worden om een uitspraak te kunnen doen over de full-scale toepasbaarheid van civieltechnische werken als reinigingsvariant.

2. 1^e inschatting marktpotentie

In dit hoofdstuk wordt de marktpotentie (vraag en aanbod) voor extensieve reiniging van verontreinigde grond met PAK en/of minerale olie behandeld.

2.1. Aanbod van grond

De totale markt aan verontreinigde grond in Nederland bedraagt meer dan 4,5 miljoen ton op jaarbasis. Jaarlijks wordt in Nederland ca. 1,5 miljoen ton grond ex-situ gereinigd. Dit betreft grond die niet ongereinigd kan worden toegepast. Een gedeelte van deze grond kan mogelijk m.b.v. extensieve technieken worden gereinigd tot een nuttig toepasbaar product. Jaarlijks wordt tevens ca. 1 miljoen ton grond gestort. Deze grond is niet-reinigbaar met (intensieve) ex-situ reinigingstechnieken en vormt derhalve geen potentieel aanbod voor de extensieve reinigingstechnieken. Aan herbruikbare grond komt jaarlijks een aanzienlijke hoeveelheid vrij (> 2 miljoen ton). Deze grond kan zonder reiniging reeds worden toegepast en vormt dus geen potentieel aanbod voor extensieve grondreiniging.

2.2. Vraag naar grond

De Dienst Weg- en Waterbouw van Rijkswaterstaat heeft diverse studies uitgevoerd naar de vraag van grondstoffen in de toekomst. In een studie naar de toepassing van secundaire grondstoffen voor ophogingen in de wegenbouw is een onderscheid gemaakt naar grote werken (> 100.000 ton) en kleine ophoogprojecten (< 100.000 ton). Hierbij zijn in totaal 154 grote werken meegenomen, en 37 kleine projecten in 3 regio's welke vervolgens zijn geëxtrapoleerd, voor de periode tot 2000. Uit deze studie volgt dat de vraag naar ophoogmaterialen circa 23 miljoen m³/jaar bedraagt, het totale aanbod van categorie 1 en 2 bouwstoffen bedraagt circa 5 miljoen m³/jaar. Uit deze studie wordt dan ook geconcludeerd dat de opnamecapaciteit veel groter is dan het aanbod. In de studie is overigens geen duidelijk onderscheid gemaakt tussen de verschillende toepassingen van ophogingen.

Uit de studie "Inventarisatie voor de nota ophoogzand" volgt dat er in de periode tot 2010 jaarlijks 24 tot 47 miljoen m³ ophoogzand benodigd is. Momenteel bestaat circa 7% van het ophoogzand uit secundaire materialen, het leeuwendeel komt voor rekening van direct hergebruik van grond en uit secundaire materialen als AVI-bodemas, zand uit baggerspecie en zeefzand. Het aandeel van (gereinigde) grond uit bodemsaneringen bedraagt momenteel slechts 0,6 %. Verwacht wordt dat het totale aandeel secundaire materialen dat wordt toegepast als ophoogzand zal oplopen tot circa 14 % in de periode 2006-2010. Het specifieke aandeel van grond afkomstig van bodemsaneringen zal naar verwachting in die periode 1 % bedragen van de totale toepassing van ophoogzand. In de genoemde studie wordt tevens aangegeven dat de grond, die wordt ingezet als secundaire bouwstof, maar niet aan de civieltechnische eisen voor ophoogzand voldoet kan worden afgezet in toepassingen als geluidswallen, bovenafdekkingen voor stortplaatsen of landschapsarchitectuur.

Een aantal concrete projecten waarin grond uit bodemsaneringen als secundaire grondstof kan worden toegepast zijn bv de aanleg van VINEX-locaties bv Leidse Rijn (Utrecht), de aanleg van de

Betuwe lijn en de aanleg van de HSL-lijn.

2.3. Samenvatting

Er is op dit moment meer vraag naar grond dan er aangeboden wordt en dat zal in de toekomst nog meer toenemen. De markt voor matig verontreinigde grond lijkt met name in toepassingen als geluidswallen, bovenafdichtingen van stortplaatsen of als landschapsarchitectonische onderdelen te liggen. Toeslagmaterialen en technische voorzieningen die nodig zijn voor de extensieve reiniging vormen hier geen belemmering voor de toepassing. Dit in tegenstelling tot grond die ingezet wordt als constructief ophoogmateriaal. Deze secundaire bouwstof moet aan striktere civieltechnische eisen voldoen. Alleen dan kan matig verontreinigde grond in toepassingen als ophogingen van wegen en terreinen extensief gereinigd worden.

3. Technische voorzieningen

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de technische voorzieningen die nodig zijn voor de extensieve reiniging in civieltechnische werken. Eerst wordt een korte toelichting gegeven met betrekking tot de toepassingeisen van matig verontreinigde grond in civiele werken en de daarmee samenhangende civieltechnische eisen.

3.1. Toepassingeisen voor hergebruik

Licht verontreinigde grond en gereinigde grond kunnen worden hergebruikt als secundaire grondstoffen als bouwstof zijnde grond. Het toepassen van secundaire grondstoffen in werken staat beschreven in het IPO-publicatienummer 106 "Werken met secundaire grondstoffen". In deze publicatie zijn de definities en de algemene toepassingeisen voor categorie 1 en categorie 2 grond weergegeven.

Voor categorie 1 secundaire grondstoffen gelden de volgende toepassingeisen:

- toepassing in functionele werken
- niet met bodem vermengen / beheersmaatregelen i.v.m. verwijderingsplicht
- minimaal 50 m³ aaneengesloten

Voor categorie 2 secundaire grondstoffen gelden de volgende toepassingeisen:

- toepassing in functionele werken
- niet met bodem vermengen / beheersmaatregel i.v.m. verwijderingsplicht
- minimaal 10.000 ton aaneengesloten
- blijvend 0,5 meter boven de GHG (Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand)
- isolerende constructie
- beheer, onderhoud en inspectie

Naast bovenstaande algemene toepassingeisen gelden er locatiespecifieke eisen die per provincie kunnen verschillen.

In het bouwstoffenbesluit wordt een werk gedefinieerd als een grondwerk, wegebouwkundig werk, waterbouwkundig werk of bouwwerk. Met een grondwerk wordt in het algemeen bedoeld een aanvulling of een ophoging. De provincies achten bovenstaande definitie te ruim voor het toepassen van categorie 1 en 2 grond en hebben bovenstaande definitie aangescherpt. De aanscherping is met name gericht op het tijdelijk karakter en het niet vermengen met de bodem. Voorbeelden van toepassingen die een werk zijn in de zin van het interprovinciale interimbeleid zijn o.a.:

- Dijklichaam
- Geluidswal
- Wegfundering
- Ophoging t.b.v. een weglichaam

Voorbeelden van toepassingen van een werk die onder de definitie van het Bouwstoffenbesluit wel

tot een werk behoren maar die geen werk zijn in de zin van het interprovinciale interimbeleid zijn o.a.:

- Opvulling van ontgrondingsput en van ondiepe gaten/putten die geen ontgroning zijn
- Ophoging van een akker t.b.v. landbouw
- Natuurontwikkeling

Naast de algemene toepassingseisen gelden er ook nog restricties op het civieltechnische vlak voor diverse toepassingen. De civieltechnische eisen voor toepassingen van secundaire grondstoffen in de bouwpraktijk zijn opgenomen in o.a. de Standaard RAW-bepalingen (1995). Voor het toepassen van bouwstoffen in ophogingen en aanvullingen gelden de volgende eisen: Het gehalte aan minerale deeltjes kleiner dan 20 μm mag ten hoogste 8% bedragen en het gehalte aan deeltjes kleiner dan 63 μm mag ten hoogste 50% bedragen. De minimale verdichtingsgraad moet ten minste 93% bedragen, de gemiddelde verdichtingsgraad moet ten minste 98% bedragen.

Voor het toepassen van bouwstoffen in zand voor zandbed gelden de volgende eisen:

- Het gehalte aan minerale deeltjes kleiner dan 63 μm mag ten hoogste 15% bedragen, indien deze waarde tussen de 10 en 15% bedraagt dan mag tevens het gehalte aan minerale deeltjes kleiner dan 20 μm ten hoogste 3% bedragen.
- Het gloeiverlies mag ten hoogste 97% bedragen, met andere woorden het organisch stof gehalte mag maximaal 3% bedragen.
- De minimale verdichtingsgraad moet ten minste 95% bedragen, de gemiddelde verdichtingsgraad moet ten minste 100% bedragen.

Volgens informatie van CROW en de bouw- en milieudienst van DWW zijn er geen specifieke voorgeschreven eisen op civieltechnisch gebied waaraan een bouwstof moet voldoen voordat deze kan worden toegepast in geluidswallen.

De technische voorzieningen moeten worden opgesplitst in een technische voorzieningen ten behoeve van het risico voor de omgeving en de technische voorzieningen ten behoeve van het biologische afbraakproces.

Technische berekeningen ed. betreffende de belasting van de ondergrond zijn buiten beschouwing gelaten. Deze items gelden evenzeer voor de toepassing van schone grond en staan dus los van het onderhavige project.

3.1.1. Technische voorzieningen m.b.t. het risico voor het milieu

Het toepassen van verontreinigde grond in een civieltechnisch werk, zoals beschreven in deze definitiestudie, is niet in te passen in het huidige wettelijke kader voor het hergebruik van secundaire grondstoffen. Om toch een inventarisatie van mogelijke technische voorzieningen op te stellen wordt uitgegaan van de toepassingseisen zoals deze zijn verwoord voor categorie 2 grond.

Isolerende constructie

Het werk zal moeten worden voorzien van een afsluitende onderafdichting (bv folie) waarmee een mogelijke uitloging van verontreinigingen naar de onderliggende grond wordt voorkomen. Middels het toepassen van deze folie wordt tevens de vermenging van de grond toegepast in het werk met

de bodem voorkomen. Afhankelijk van de aard van het werk moet de folie worden aangevuld met een steunlaag bestaande uit schoon zand. Daarnaast wordt door middel van deze constructie voldaan aan de eis i.v.m. de verwijderingsplicht.

Afhankelijk van de toepassing en de verontreinigings situatie in de toegepaste grond zal het werk ook moeten worden voorzien van een bovenafdichting. Deze bovenafdichting kan eveneens bestaan uit een (luchtdoorlatend) folie of geotextiel. Vooralsnog wordt er van uitgegaan dat een bovenafdichting niet wordt toegepast.

Onderhoud en beheer

Bij het toepassen van een onderafdichting van het werk middels een folie en het afwezig zijn van een bovenafdichting moet het percolatie water, afkomstig van overtollig regenwater, worden opgevangen en worden afgevoerd. Voor de afvoer van percolatiewater worden op de folie drains aangelegd. Het percolatiewater wordt vervolgens afgepompt en over een waterzuivering geleid. Voor het ontwerp van de waterzuivering wordt uitgegaan van de gemiddelde regenwateroverschot in de maand met het meeste wateroverschot. Voor de buffercapaciteit van het overtollige regenwater wordt uitgegaan van een neerslag tijdens een hevige regenbui (35 mm in een half-uur tijd).

Monitoring

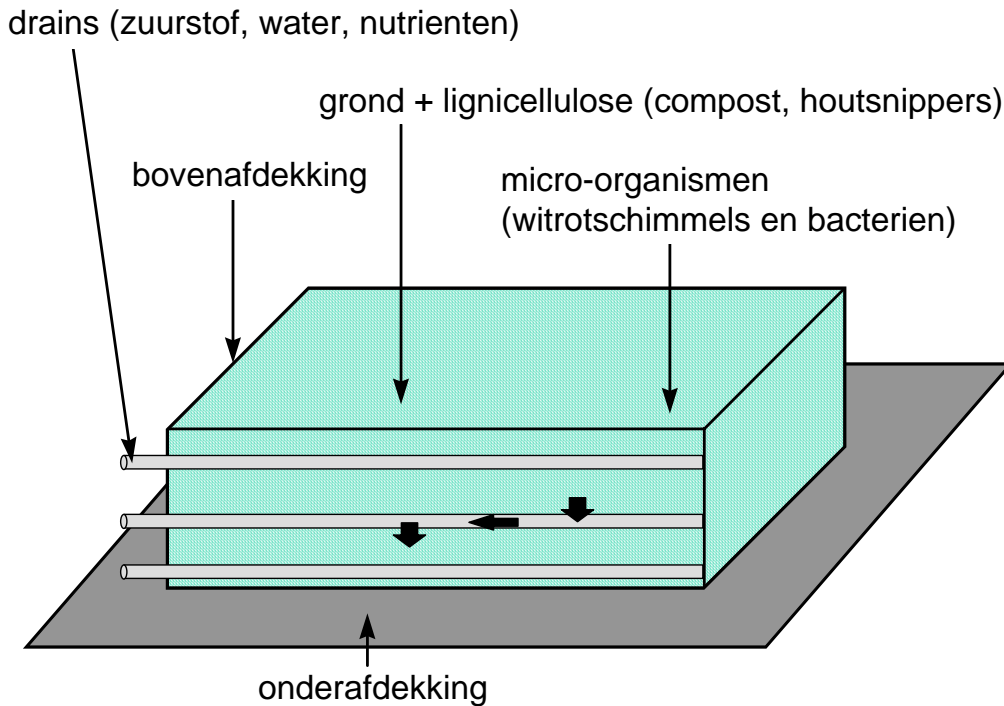
De monitoring van de onderafdichting vindt plaats door drains aan te leggen onder het folie. De monitoring van de afvang van percolatiewater vindt plaats middels registratie van het afgevoerde percolatiewater. De monitoring van de waterzuivering vindt plaats middels periodieke effluentanalyses.

3.1.2. Technische voorzieningen i.v.m. het biologische afbraakproces

De technische voorzieningen ten behoeve van het biologische afbraakproces worden in deze paragraaf besproken. De biologische beweegredenen achter deze deelonderwerpen worden in het volgende hoofdstuk verder uitgewerkt.

- Het toevoegen van micro-organismen en/of toeslagstoffen dient bij voorkeur plaats te vinden tijdens het aanbrengen van de grond in het werk. Dit kan tezamen plaatsvinden met de voorbehandeling van de grond, die bestaat uit het zeven en/of homogeniseren van de grond.
- Het toevoegen van nutriënten en water i.v.m. de vochtregulatie vindt, indien noodzakelijk, plaats middels het aanbrengen van infiltratiesystemen in de bovenste laag van het werk, en eventueel afhankelijk van de grootte van het werk in een tussenlaag. De infiltratiesystemen kunnen bestaan uit materialen die in de land-en tuinbouw worden toegepast.
- Voor het verkrijgen van het noodzakelijk aërobe milieu in het werk wordt er middels het afzuigen van lucht een (geringe) onderdruk in het werk aangebracht. De afgezogen lucht wordt als gevolg van de aangelegde onderdruk vervangen door zuurstofrijke omgevingslucht. Middels deze methode wordt een aëroob milieu gecreëerd in het aan te leggen (biologische) werk. Door het aanleggen van een onderdruk wordt tevens een ongecontroleerde emissie van vluchtige verbindingen tegengegaan. Het aanleggen van de onderdruk wordt bewerkstelligd door het aanleggen van (horizontale) luchtonttrekkingsfilters aan de onderzijde van het werk. De lucht zal middels een vacuumblower worden afgezogen en via een demisterpakket, waarin condenswater wordt afgescheiden, en indien noodzakelijk via een luchtzuivering, naar de

omgeving worden afgevoerd.



Figuur 1 Voorbeeld van de technische voorzieningen bij een civieltechnisch werk

3.2. Samenvatting

Om matig verontreinigde grond toe te mogen passen moet aan een aantal civieltechnische en milieutechnische eisen voldaan worden. De eisen zijn ontwikkeld voor categorie 2 secundaire grondstoffen en staan hieronder samengevat.

Tabel 1 Civieltechnische en milieutechnische eisen mbv tot toepasbaarheid van verontreinigde grond

Civieltechnische eisen	kostenposten	Milieutechnische eisen	kostenposten
voor opvulling/aanvulling: <ul style="list-style-type: none"> • minerale deeltjes: <63µm: max. 50% <20µm: max. 8% • verdichtingsgraad: 93-98% 	→ voorbehandeling (zeven)	isolering: <ul style="list-style-type: none"> • niet bodem mengbaar • min. 0.5m boven GHG • min. 10 kton • onderhoud, beheer, • monitoring 	→ folie → steunlaag → drains (luchtontrekking) → waterzuivering van percolaat → bemonstering
voor zandbed: <ul style="list-style-type: none"> • minerale deeltjes: <63µm: max. 15% <20µm: max. 3% • verdichtingsgraad: 95-100% • org. stof: max. 3% 	→ aanleg		

4. Bio(techno)logische voorzieningen

In dit hoofdstuk worden de bio(techno)logische voorzieningen die een rol spelen bij deze manier van grondreiniging behandeld. De volgende paragraaf behandelt de reinigingsrendementen van de verschillende typen bodems verontreinigd met PAK. Deze literatuurgegevens zijn gekoppeld aan het Databestand van SCG om een voorspelling te kunnen doen over het marktpotentieel.

4.1. Inventarisatie bio(techno)logische voorzieningen grondreiniging

De biotechnologische voorzieningen die een belangrijke (snelheidsbepalende) rol spelen bij het afbraakproces van PAK en olie staan hieronder weergegeven en worden verder in de paragraaf uitgewerkt.

- I. Zijn er voldoende PAK en olie-afbrekende micro-organismen aanwezig?
- II. Is de oxidant zuurstof voldoende beschikbaar?
- III. Is de verontreiniging voldoende beschikbaar en daarmee afbreekbaar?
- IV. Zijn de juiste omgevingsomstandigheden (vochtgehalte, nutriënten, temperatuur) aanwezig?

I. PAK en olie-afbrekende micro-organismen (bacteriën en (witrot)schimmels)

Bacteriën en niet-witrotschimmels zijn in staat laagmoleculaire PAK af te breken, witrotschimmels hoogmoleculaire PAK. Witrotschimmels maken daarbij gebruik van extracellulaire enzymen, terwijl bacteriën en niet-witrotschimmels deze ontberen. De hoogmoleculaire PAK worden met behulp van de extracellulaire enzymen initieel geoxydeerd. De gevormde, meer hydrofiele afbraakproducten kunnen door bacteriën en niet-witrotschimmels verder afgebroken worden (Meulenberg *et al.*, 1997). Volledige afbraak van alle PAK wordt dus mogelijk geacht door de combinatie van de genoemde type micro-organismen.

Om er zeker van te zijn dat er voldoende PAK en olie-afbrekende micro-organismen aanwezig zijn in de verontreinigde grond, dienen:

de specifieke PAK-afbrekende micro-organismen toegevoegd te worden (bio-augmentatie) of de juiste afbraakomstandigheden voor de reeds aanwezige micro-organismen gecreëerd te worden.

Het voordeel van bio-augmentatie is dat de zekerheid bestaat dat de toegevoegde micro-organismen in staat zijn zonder lange lag-fase de verontreinigingen af te breken. De nadelen van bio-augmentatie zijn dat:

- 1a) het opkweken van micro-organismen kostbaar is; zeker wanneer zoals bij witrot-schimmels het cosubstraat lignine (hout) toegevoegd dient te worden om de productie van extracellulaire enzymen te kunnen garanderen. Het toevoegen van co-substraat heeft bovendien als nadeel dat de stevigheid van de 'biopile' constructie in gevaar kan komen.
- 1b) micro-organismen door onvoldoende acclimatisatie competitief zwak kunnen zijn.

Veldexperimenten hebben aangetoond dat door bio-augmentatie de initiële afbraak weliswaar versneld kan worden, maar dat het uiteindelijke reinigingsrendement nagenoeg hetzelfde is.

Tijdens het experiment neemt de totale hoeveelheid micro-organismen af tot het hoeveelheid die van nature reeds in de bodem aanwezig is, waarschijnlijk als gevolg van competitie (Trzesickamlynarz & Ward, 1996). Bio-augmentatie lijkt dus alleen zinvol te zijn, wanneer op korte termijn resultaat geboekt dient te worden.

Bij het creëren van de juiste afbraakomstandigheden is het belangrijk te weten of de voor de afbraak belangrijke micro-organismen reeds aanwezig zijn. Omdat in de meeste gevallen de verontreinigingen er reeds meer dan tientallen jaren liggen, is het correct aan te nemen dat de juiste micro-organismen in de bodem aanwezig zijn. Deze zijn aangepast aan het type verontreiniging (Durant, Wilson & Bouwer, 1994). Stimulering van groei en afbraak lijkt een voor de hand liggende variant (Kastner, Breuerjammali & Mahro, 1998). Net als bij in-situ saneringen van andere verontreinigingen (PER, TRI, HCH, BTEX) is het belangrijk om te weten wat de juiste omstandigheden zijn, voordat gestart wordt met een gestimuleerde optie.

II. Beschikbaarheid oxidant zuurstof

Lucht (zuurstof)

PAK en olie worden onder aërobe omstandigheden afgebroken. Volledige anaërobe omzetting is tot op heden nog niet aangetoond. De bij aërobe processen gebruikte oxidant, zuurstof, heeft echter een lage wateroplosbaarheid, 9 mg.l^{-1} bij $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Bovendien wordt zuurstof ook gebruikt voor de omzetting van andere zowel organische als anorganische verbindingen die in de bodem voorkomen. Wanneer zuurstof niet snel genoeg aangevoerd wordt, als gevolg van een lage beluchtingssnelheid of lage grondwaterstromingssnelheid, wordt de aërobe omzetting van PAK en olie snelheid gelimiteerd. Zuurstoflimitatie kan worden tegengegaan door drains aan te leggen. Lucht kan door de drains aangezogen worden of de bodem ingeblazen worden. Een ander mogelijkheid om zuurstoflimitatie tegen te gaan is het grondmateriaal opmengen met poreuzer materiaal. Echter, de totale porositeit neemt pas significant toe wanneer er veel poreus materiaal bij grond opgemengd wordt. Het poreuze materiaal dient achteraf weer gescheiden te worden van de verontreinigde grond. Hierdoor wordt dit hoogstwaarschijnlijk economisch niet haalbaar.

Waterstofperoxide

Er kan ook gekozen worden voor een indirecte zuurstofvoorziening, door waterstofperoxide te gebruiken (Pardieck, Bouwer & Stone, 1992). Hierbij kan waterstofperoxide hetzij microbiologisch, hetzij electrochemisch (Ligtvoet & Schmal, 1992) omgezet in zuurstof en waterstof. Van waterstof is bekend dat deze een intermitterende rol speelt bij de reductie van o.a. chloorwaterstoffen en mogelijk ook bij polycyclische aromatische koolwaterstoffen. Bij de toepassing van waterstofperoxide dient wel rekening gehouden te worden met:

- het chemisch verbruik van waterstofperoxide door oxidatie van andere ((an)organische) verbindingen
- het concentratieniveau (toxiciteit $< 100 \text{ mg.l}^{-1}$) van de waterstofperoxide voor de micro-organismen
- de werkelijke beschikbaarheid van zuurstof en waterstof voor de omzetting van PAK en olie

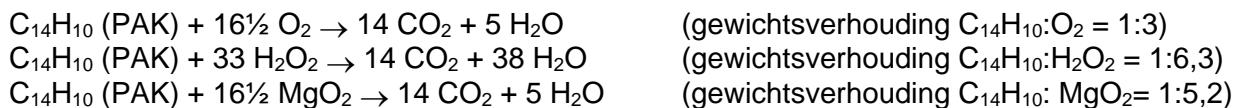
Bij extensieve behandeling van de grond zal om voldoende heterogeniteit te kunnen verzekeren waterstofperoxide of zuurstof op verschillende punten gedoseerd moeten worden. Alleen dan kan zuurstof dichtbij de verontreiniging gebracht worden. Het is bekend dat waterstofperoxide in een

eerste stadium in lagere concentraties pulsgewijs toegevoegd kan worden. Op deze manier wordt voorkomen dat de PAK en olie-afbrekende micro-organismen in hun afbraak geremd worden als gevolg van toxiciteitseffecten. Door microbiële aanpassing kan later de concentratie waterstofperoxide opgevoerd worden tot 1000 mg.l⁻¹. Ditzelfde geldt voor de directe dosering van zuurstof. Overdosering van zuurstof en waterstofperoxide heeft als nadeel dat de hoeveelheid gas dat direct of na reactie vrijkomt en niet gebruikt wordt, voor stripeffecten kan zorgen. De afgas dient dan mogelijk nagezuiverd te worden. Het is daarom van belang het systeem goed te dimensioneren. Met behulp van de onderstaande stoichiometrische vergelijkingen is de zuurstof- en waterstofperoxidebehoefte van voor de afbraak van de verontreiniging in de grond berekend. Zoals reeds vermeld, wordt zuurstof naast de afbraak van de verontreiniging ook voor de afbraak van organisch koolstof, voor de oxidatie van anorganische verbindingen, aanwezig in de bodem, ook voor de groei van micro-organismen gebruikt. Het berekende getal is de minimale zuurstofbehoefte. Per type grond moet experimenteel vastgesteld worden hoeveel de werkelijke zuurstofbehoefte bedraagt.

ORC (Oxygen Release Compound)

ORC is een gepatenteerde formule voor magnesiumperoxide (MgO₂) of magnesiumhydroxide (MgOH₂) wanneer het om de gehydrateerde vorm gaat. ORC is zo ontwikkeld dat het zuurstof met een lage snelheid kan doseren aan zijn omgeving. De doseringssnelheid van zuurstof is afhankelijk van de zuurstofvraag en daarmee de verontreinigingsgraad in de bodem. Over het algemeen is de levensduur van ORC zo'n 6 maanden. ORC kan tijdens de voorbehandeling in poedervorm toegevoegd worden aan de grond.

Luchtinjectie/waterstofperoxide/ORCbehoefte:



Met een PAK-verwijdering van 1 mg/kg grond/dag geeft dit een minimale zuurstofbehoefte van 3mg/kg grond/dag, omgerekend is dit 2,1.10⁻⁶ m³ O₂/kg grond/dag, wat neerkomt op 1,2.10⁻⁵ m³ lucht/kg grond/dag. Voor 10.000 ton grond komt dit overeen met een luchtdebiet van 5 m³ lucht per uur. Uitgaande van een waterstofperoxide oplossing van 100 mg/l (=24 mg O₂/l) komt de behoefte uit op 125 ml/kg grond/dag. Voor 10.000 ton komt dit overeen met 1250 m³/dag. Bij een 1000 mg/l waterstofperoxide oplossing is het verbruik een factor 10 lager. Het verbruik van een 35% waterstofperoxide oplossing is dan 360 l/dag. 1 liter waterstofperoxide (35%) bedraagt ongeveer 70 ct. De verbruikskosten bedragen f 9,20/ton/jaar. Hierbij zijn de kosten voor pompen en infiltratie voor het inbrengen van waterstofperoxide nog niet meegenomen.

Met een PAK-concentratie in de grond van 500 mg/kg, komt dit neer op 2,6 kg ORC/ton grond. De kostprijs van ORC is \$10/pound, wat f45/kg is. De kosten aan ORC zijn f120/ton grond. PAK moet bovendien binnen 6 maanden verwijderd kunnen worden, aangezien de ORC slechts 6 maanden werkzaam is.

Uit bovenstaande volgt dat zuurstofverrijking van de grond het meest kosteneffectief kan worden bewerkstelligd met het toedienen van lucht.

III. Beschikbaarheid verontreiniging

PAK en olieverbindingen die reeds jaren geleden in de bodem terecht gekomen zijn, zijn slecht biologisch beschikbaar. Er zijn twee oplossingen om de beschikbaarheid te verhogen:

- 1) de grond en aanwezige grondwater pre-oxideren met behulp van chemische en/of electrochemische methoden,
- 2) het toedienen van surfactants (synthetisch of biogenisch).

Het voordeel is het opheffen van de snelheidsbepalende stap. Het nadeel van pre-oxidatie zijn de hoge kosten en de chemische afvalstroom. Het voordeel van het toevoegen van surfactants is dat het niet alleen de bereikbaarheid van de verontreinigingen vergroot, maar ook die van micro-organismen, nutriënten en mogelijk zuurstof. De nadelen zijn:

- A) de hoge kosten en
- B) het gebruik van surfactant als C-bron. Wanneer er voldoende C-bron voor hande is, kan overmatige niet-PAK-specifieke celgroei optreden. Toename in biomassa betekent grotere totale zuurstofconsumptie en mogelijk afname van de porositeit als gevolg van verstoppingen. Als surfactanten worden niet-ionogene surfactanten gebruikt (Brij 30, Brij 35, Triton X-100, Tergitol NPX en Tween 80) (Volkering, 1996; Yeom, Ghosh & Cox, 1996; Yeom *et al.*, 1995)

IV. Omgevingsomstandigheden

Vochtgehalte en pH

Het vochtgehalte van de bodem is belangrijk omdat verontreinigingen en afbraakproducten daarin op kunnen lossen en dat micro-organismen zich zo beter kunnen verplaatsen. Een te hoog vochtgehalte zorgt voor een langzamere zuurstofoverdracht. Het optimum vochtgehalte ligt tussen de 50% en 70% van de "water holding capacity" (Mohammed *et al.*, 1996). Door een folie over de gestorte grond heen te plaatsen en door regelmatig in de grond het vochtgehalte te meten, kan het vochtgehalte in de tijd gevolgd worden. Een tekort aan vocht kan aangevuld worden met water. Een overschot aan vocht kan gereguleerd worden door gebruik te maken van vochtdoorlatend foliemateriaal of door het folie tijdelijk te verwijderen, zodat het vocht kan verdampen. De meeste bacteriën kunnen het beste groeien bij een neutrale of licht alkalische pH. Onder pH 5 vindt nauwelijks groei plaats. Het pH-optimum is variabel, daarom wordt voornamelijk aangenomen dat pH 7 de beste resultaten geeft. Er wordt niet verwacht dat de pH gereguleerd hoeft te worden.

Nutriënten

Micronutriënten en spore elementen zijn t.o.v. zuurstof meestal niet limiterend voor microbiële groei, macronutriënten, zoals N en P, vaak wel. De koolstof-stikstof-fosfaat-verhouding varieert van 100:10:1 tot 100:1:0,5. De optimale verhouding hangt af van 1) het type behandeling (aëroob of anaëroob) en de fase van de verontreiniging (waterfase of vaste fase) (Mohammed *et al.*, 1996). Nutriënten kunnen reeds bij opmenging toegevoegd worden, dit zorgt voor de meest optimale menging.

Temperatuur

Over het algemeen zorgt een verhoging van de temperatuur voor verhoogde omzetting van de verontreiniging. Of dit nu het gevolg is van alleen de toename in microbiële populatie en

verhoogde enzymactiviteit of door het versnelde desorptieproces van PAK en olie, of door de combinatie, is niet bekend. Een optimale temperatuur ligt tussen 20 °C en 30 °C (Mohammed *et al.*, 1996). Het aanleggen van een grondverwarmingsinstallatie is een dure optie. Door stoffen zoals compost of kunstmest toe te voegen blijkt de temperatuur in een 'biopile' door de toename in microbiologische groei ook toe te nemen, zij het vaak plaatselijk. Door beluchting kan deze warmte ook naar andere delen van de 'biopile' overgedragen worden.

Tabel 2 Afbraakversnellende componenten

	Afkomstig van; nodig voor	Dosering	Kosten	Referentie
Micro-organismen	bacteriën: - slibinstallatie (ophalen) - kweken in reactor (witrot)schimmels: - champost (ophalen) - kweken in reactor	gem. 10^4 - 10^6 kve/g grond min.-max. 10^3 - 10^9 kve/g grond 1-10 g micro-organismen/ kg grond (aanname: 1-10%)	- f10,-/ton grond - f1500-f15000,-/ton grond ^o - f10,-/ton grond - f1500-f15000,-/ton grond ^o	(Doddema, 1997; Durant <i>et al.</i> , 1994)
Zuurstof	zuurstofconsumptie door: - (neven)verontreinigingen - (an)organische verbindingen - micro-organismen (groei)	lucht: minimaal $1,2 \cdot 10^{-5}$ m ³ /kg grond/dag waterstofperoxide: minimaal $1,25 \cdot 10^{-5}$ m ³ /kg grond/dag ORC: minimaal 2,6 kg ORC/ton grond	- f 1,5/ton grond/jaar ^{>} - f 9,2/ton grond/jaar ^{>} - f 120/ton [%] (6 mnd)	Vis, 1998 #256]
Surfactant	Verhogen beschikbaarheid (niet-ionogene surfactants)	40 g/kg d.s.	f 150,-/ton grond ⁺	(Harkes, 1998)
Nutriënten	Kunstmest	C:N:P = 100:10:1-100:1:0,5 10-100 g kunstmest/kg grond	f 4-40/ton grond ⁻	http://www.fmb-group.co.uk/
Vochtgehalte	reguleren binnen 50-70%	folie over biopile	f1,8/ton grond	(Mohammed <i>et al.</i> , 1996)

kve/g = kolonie vormende eenheden per gram grond

^o 10 g micro-organismen/kg grond à fl 1500,-/kg micro-organismen \equiv f 15/kg grond

⁺ 40 g/kg d.s. \equiv 25 g surfactant /kg grond à f 6/kg surfactant (min. afname 1 ton) \equiv f 0,15/kg grond

⁻ 10-100 g kunstmest/kg grond à f 400/ton (bulk) \equiv f 0,004-0,04/kg grond

[>] bij een PAK-verwijderingssnelheid van 1 mg/kg grond/dag

[%] bij een PAK-startconcentratie van 500 mg/kg

4.2. Samenvatting

De biotechnologische aspecten die belangrijk zijn bij het afbraakproces van PAK worden hieronder behandeld. In tabel 3 van de kosten van de toegevoegde afbraakversnellende componenten weergegeven.

I. Zijn er voldoende PAK en olie-afbrekende micro-organismen aanwezig?

Micro-organismen die voor een initiële versnelde PAK-afbraak dienen te zorgen, zijn alleen economisch rendabel toepasbaar, wanneer deze uit een slibinstallatie gehaald kunnen worden of

vanuit de champostverwerkende industrie. Het opkweken in reactoren is niet rendabel.

II. Is de oxidant zuurstof voldoende beschikbaar?

De oxidant zuurstof is noodzakelijk voor het afbraakproces van PAK. Alternatieven voor luchtinjectie zijn waterstofperoxide en ORC's (Oxygen Release Compound) . Onbekend is wat de meerwaarde van het gebruik van waterstofperoxide boven lucht is. Afhankelijk van het type grond en daarmee de opbrengst is het misschien mogelijk om waterstofperoxide in te zetten. Echter, op dit moment vormt waterstofperoxide een grote kostenpost op het totaal bedrag. Het aanleggen van een extra netwerk van injectiebuizen dat voor de toevoer van waterstofperoxide moeten zorgen, is nog niet bij de kosten inbegrepen. ORC is te duur.

III. Is de verontreiniging voldoende beschikbaar en daarmee afbreekbaar?

Het toevoegen van surfactants lijkt niet haalbaar. De kosten zijn hoger dan de opbrengst. Een alternatief voor het gebruik van surfactants om PAK te kunnen mobiliseren is het inzetten van elektroden (electroreclamatie). Hiermee zijn tot op heden weinig full-scale experimenten uitgevoerd, waardoor een prijsindicatie ontbreekt. Waarschijnlijk is de prijs ter hoog.

IV. Zijn de juiste omgevingsomstandigheden (vochtgehalte, nutriënten, temperatuur) aanwezig?

Kunstmesttoevoeging is bij lagere dosering haalbaar. Het vochtgehalte en de temperatuur kunnen door slimme dimensionering en gebruik maken van afdekfolie gecontroleerd worden. Van de pH wordt verwacht dat deze redelijk constant zal blijven. Aangezien de matig verontreinigde grond geselecteerd wordt op lagere concentraties zware metalen wordt verwacht dat deze stoffen niet remmend zullen werken op het afbraakproces. De aanwezigheid van andere toxische verbindingen wordt op dit moment buiten beschouwing gelaten.

Tabel 3 Samenvatting afbraakversnellende componenten

Componenten	Eenmalige kosten (f/ton)	Jaarlijkse kosten (f/ton/jaar) ¹
micro-organismen	min: 10 (ophalen) max. 1500-15000 (kweken)	
zuurstof		min. 1,5 (O ₂) max. 9,2 (H ₂ O ₂)
surfactant	150	
nutriënten	min. 4 (1%) max. 40 (10%)	
vochtgehalte temperatuur (folie)	1,8	

¹ bij een toepassing in een geluidswal over een periode van 4 jaar

5. Marktpotentie gespecificeerd naar type bodem

In dit hoofdstuk is op basis van reinigingsrendementen onderzocht wat de marktpotentie van extensieve reiniging is voor de verschillende typen bodems.

5.1. Reinigingsrendementen

De verontreinigingen polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAK) en olie komen meestal gecombineerd voor. Onbekend tot op heden is onder welke omstandigheden PAK en olie goed afgebroken kunnen worden. Met name de biologische beschikbaarheid (biobeschikbaarheid) van PAK en de zwaardere olie-ketens (C₂₀-C₄₀) zijn van invloed op de afbraaksnelheid en het uiteindelijk te bereiken reinigingsrendement. De biologische beschikbaarheid (omgevingsfactor) is onder meer afhankelijk van het type grond, bijvoorbeeld zand, zilt of klei en het organisch stofgehalte. De deeltjesgrootte samen met de ouderdom van de verontreiniging bepaalt de adsorptiegraad aan de bodem. De herkomst van de verontreiniging, bijvoorbeeld gasfabrieksterrein of creosoteerbedrijf, zorgt voor een variëteit aan af te breken verontreinigingen, maar ook het voorkomen van de verontreiniging. Op gasfabrieksterreinen zijn PAK vaak in kristallijne vorm aanwezig. Dit kan grote invloed hebben op de afbraaksnelheid (Eijsackers, 1994). Naast de biobeschikbaarheid zijn ook afbraakomstandigheden (biologische factoren) van belang. De temperatuur, de pH en het vochtgehalte, de aanwezigheid van de juiste micro-organismen (bacteriën en (witrot)schimmels) en anorganische nutriënten, zoals zuurstof (aërobe omzetting) en een stikstofbron (groei micro-organismen) bepalen of PAK en olie dan wel volledig, partieel of niet afgebroken zullen worden. Deze onderdelen zijn in het hoofdstuk hiervoor beschreven.

Om een uitspraak te kunnen doen over de relatie tussen het reinigingsrendement van PAK en minerale olie, het type bodem, het type verontreiniging en de te verwachten saneringsduur is er een literatuuronderzoek uitgevoerd in de volgende literatuurbestanden:

- Current Contents; 1994-heden (database literatuursysteem)
- Batelle In situ and on site bioremediation congressen; 1993, 1995, 1997
- Consoil congressen; 1995, 1998
- EPA-bestanden (internet databases)
- Overige internet searches

De gegevens (60 artikelen) uit het literatuuronderzoek zijn gegroepeerd en integraal opgenomen in een overzichtstabel, die in de bijlagen is opgenomen. De tabel is in 3 gedeeltes onderverdeeld: 1) laboratoriumschaal (lab-scale, 31 referenties), 2) pilot-scale en full-scale (20 referenties) en 3) onbekende schaal (9 referenties). Elke schaal bevat respectievelijk gegevens over:

1. het type grond (percentage zand, zilt, klei)
2. het percentage organisch stof
3. de totale hoeveelheid PAK (Σ PAK, somparameter) en olie aan het begin en einde van een experiment
4. de hoeveelheid PAK aan het begin en einde van een experiment, opgesplitst per type PAK (3R betekent dat de betreffende PAK bestaat uit 3 aromatische ringen)

5. de tijd dat een experiment geduurd heeft
6. het verwijderingspercentage van Σ PAK, PAK en olie, daar waar mogelijk is de halfwaardetijd weergegeven
7. de historie
8. de types nutriënten die zijn toegevoegd
9. het type micro-organismen dat is toegevoegd
10. de experimentele omstandigheden (T, pH, vochtgehalte)

Bij het rubriceren van de gegevens uit de artikelen in de overzichtstabel zijn de volgende aspecten waargenomen:

- Het type grond wordt, wanneer het wordt genoemd, vaak aangegeven zonder het percentage zand, klei of zilt. Voor het percentage organisch stofgehalte geldt hetzelfde.
- In de meeste gevallen worden PAK-data als somparameter aangeduid en niet gespecificeerd per individuele PAK, het aantal aromatische ringen. Voor olie geldt hetzelfde. Daar geldt geen onderscheid tussen lichte en zwarte olie-ketens.
- Er zijn weinig gegevens bekend over het gecombineerd voorkomen en afbraak van de verontreinigingen PAK, olie (en BTEX). De reden dat er weinig gegevens over olie-afbraak alleen in de overzichtstabel zijn opgenomen, komt doordat de zoekactie merendeels gericht was op PAK.

De conclusie m.b.t. de overzichtstabel (Bijlage A) is dat er nogal wat lege plekken zijn.

Om de leesbaarheid van de overzichtstabel te vergroten, zijn er per type bodem of gecombineerde bodemtypes een drietal kleinere tabellen gegenereerd met daarin vermeld de soort verontreiniging, de schaal, de begin en eindconcentratie, het reinigingsrendement en de tijdsduur van het experiment. Het type bodem dat procentueel het meeste voorkomt op de betreffende locatie wordt als eerste genoemd. Een zand-silt bodem is een bodemtype waarin relatief meer zand voorkomt dan silt.

Reinigingsrendement en tijdsduur van PAK en olie-afbraak

Tabel 4 Klei en gecombineerde klei, silt bodems

Type bodem	verontreiniging	Schaal	Begin-eind concentratie	Reinigingsrendement (%)	tijd (mnd.)
klei	∑PAK	Veld (gestim.)	onbekend	90	4-5
	∑PAK	Veld (gestim.)	onbekend	100	4-5
	Olie	Veld (gestim.)	9763 ppm	50 en 99	2 en 12
klei-silt	∑PAK	Veld (gestim.)	1316-218 mg/g	83	12

Tabel 5 Zand en gecombineerde zand, silt, grind, leem en klei bodems

Type bodem	Verontreiniging	Schaal	Begin-eind concentratie	Reinigingsrendement (%)	tijd (mnd.)
zand	∑PAK	Veld (ongestim.)	onbekend	20-95	3
	∑PAK	Lab (gestim.)	1100 mg/kg	95	3
	PAK en olie	Veld (gestim.)	100-1 mg/kg en 1700 – 400 mg/kg	99 en 76	14
zand-silt	∑PAK	Lab (gestim.)	2420-158 mg/kg	93	1
	∑PAK	Lab (gestim.)	2062-863 mg/kg	58	1
	∑PAK	Lab (gestim.)	241-231 mg/kg	4	1
	PAK(3-4R, 5R)	Lab (ongestim.)	1571 – onbekend	30-65 en 1-3	2
	PAK(3R,4R, 5R, 6R)	Veld (ongestim.)	29,5-11,86 ppm	69, 27, 97, 99 gem. 60	10-11
zand-grind	PAK(2-3R)	Veld (gestim.)	onbekend	54-70	30
zandig-leem	∑PAK	Veld (gestim.)	1485-35 ppm	98	7
	∑PAK	Lab (gestim.)	200/1800 - onbekend	70-90	6
zand-klei	∑PAK (2R)	Lab (gestim.)	11-0 mg/kg	100	3
	∑PAK	Veld (gestim.)	10/32000-onbekend	60	4
	∑PAK	Veld (gestim.)	10000/32000-onbekend	42	4
zand-silt-klei	PAK(2R, 3R, 4R) en BTEX	Veld (gestim.)	94,72-2,63 mg/kg en 21,15-0,78 mg/kg	99, 98 en 92/96	3
	PAK(3-4R en 5R)	Lab (ongestim.)	11 ppm – onbekend	25-50 en 9	2
	PAK(3-4R)	Lab (ongestim.)	2 ppm – onbekend	25-50	2
	PAK(3R en 4-5R)	Lab (ongestim.)	269 ppm-onbekend	60 en 2-10	2
	Olie	Veld (gestim.)	12980ppm-onbekend	90	8
	Olie	Veld (gestim.)	12980ppm-onbekend	86	3
zand-klei-silt	∑PAK	Lab (gestim.)	2/32 – onbekend	95-97	8

Tabel 6 Silt de gecombineerde silt, klei, zand bodems

Type bodem	Verontreiniging	Schaal	Begin-eind concentratie	Reinigingsrendement (%)	tijd (mnd.)
silt-klei	ΣPAK	Veld (ongestim.)	425-100 ppm	76	3
silt-zand-klei	ΣPAK	Lab (gestim.)	162-24 mg/kg	85	1
silt-klei-zand	ΣPAK	Lab (ongestim.)	0.082ppm-onbekend	1-5	2
	PAK(2R, 3R, 4R, 5R)	Lab (gestim.)	2162mg/kg-onbekend	93, 88, 87, 45	8

Om per (gecombineerd) bodemtype een uitspraak te kunnen doen over het reinigingsrendement van PAK en olie in het veld, zijn de bovenstaande tabellen aan de volgende criteria onderworpen:

- Er wordt uitsluitend gekeken naar pilot-scale en full-scale proeven, lab-scale proeven worden niet meegenomen, tenzij er over het desbetreffende type bodem geen gegevens bekend zijn over pilot-scale of full-scale proeven. De reden dat lab-scale proeven uitgesloten zijn, is vanwege de enorme verschillen in omstandigheden en de meestal korte tijdsduur, minder dan 2 maanden, van de uitgevoerde experimenten.
- De gegevens worden onderverdeeld in een tijdsduur korter en langer dan een jaar.
- Wanneer gecombineerde bodemtypes overlap vertonen, zoals zand-klei en klei-zand worden deze geïntegreerd.

Dit levert het volgende overzicht:

Tabel 7 Reinigingsrendement PAK en olie gecategoriseerd per type bodem en reinigingsduur

Type bodem	Reinigingsrendement (%)			
	Olie		ΣPAK	
	< 1 jaar	> 1 jaar	< 1 jaar	> 1 jaar
zand	NSG	76 (1 exp)	20-95 (1 exp)	99 (1 exp)
zand-silt	NSG	NSG	27-99 (2 exp)	NB
zand-klei	NSG	NSG	42-60 (2 exp)	NB
zand-silt-klei	86-90 (2 exp)	NSG	92-99 (1 exp)	NB
zand-grind	NSG	NSG	54-70 (1 exp)	NB
zandig-leem	NSG	NSG	98 (1 exp)	NB
klei	50-90 (1 exp)	NSG	90-100 (2 exp)	NB
klei-silt, silt-klei	NSG	NSG	76-83 (2 exp)	NB
silt	NSG	NSG	NB	NB

NB=niet bekend; NSG=niet specifiek gezocht

Aan de hand van de gegevens die in tabel 7 vermeld zijn, kan een eerste uitspraak gedaan worden over de reinigingsrendementen per type bodem. Hierbij dient aangetekend te worden dat de database incompleet is en dat het daarom de voorkeur geniet de database aan te vullen (o.a. met minder positieve afbraakresultaten) en vervolgens met behulp van statistiek een correlatie-analyse erop los te laten.

- Het gemiddeld reinigingsrendement voor Σ PAK binnen één jaar tijd op een zanderige bodem is 60%, met een spreiding van 20% (6 referenties). Of het nu alleen om een zand, een zand-silt, een zand-klei of een zand-grind type bodem gaat, lijkt niet uit te maken. De combinatie zand-silt-klei of een zandig-leem, geeft een hoger rendement, 92-99% (2 referenties).
- Het reinigingsrendement voor Σ PAK op een zanderige bodem met een looptijd van meer dan één jaar is 99% (1 referentie).
- Het gemiddeld reinigingsrendement voor Σ PAK binnen één jaar tijd op een kleiïge bodem is 85%, met een spreiding van 10% (4 referenties). De aanwezigheid van silt in de kleiïge bodem lijkt niet uit te maken. Er zijn geen gegevens bekend over reinigingsrendementen van Σ PAK met een langere looptijd.
- Het reinigingsrendement van olie binnen één jaar tijd op zanderige bodems is 86-90% (2 referenties). Langer dan één jaar lijkt geen verbetering te geven, een reinigingsrendement van 76% (1 referentie).
- Het reinigingsrendement van olie op kleiïge bodems varieert enorm, 50-90% (1 referentie). Er zijn geen gegevens bekend over het reinigingsrendement op langere termijn.

Uit de resultaten van de verschillende bodemtypes kan afgeleid worden dat er een grote spreiding in de verschillende reinigingsrendementen van Σ PAK en olie bestaat. Geheel tegen de verwachting in lijken Σ PAK in kleiïge bodems beter verwijderd te worden dan in zandige bodems. Hierbij moet echter in overweging genomen worden dat het vergelijken van reinigingsrendementen concentratie onafhankelijk is en daarom niet zo veel zegt over de verwijderde hoeveelheid PAK. Er zijn te weinig gegevens bekend over de reinigingsrendementen van de afzonderlijke PAK (2-3R en 4-6R). Hierdoor is het niet mogelijk de afbraak van PAK en olie in relatie tot het molecuulgewicht te brengen. Ditzelfde geldt voor de relatie tussen PAK en olie afbraak en organisch stofgehalte.

De verkregen gegevens uit de literatuurstudie naar reinigingsrendementen zijn onafhankelijk gecombineerd met praktijkervaringen welke zijn weergegeven in het handboek bodemsaneringen en ervaringen met het onderzoek naar de afbraak van PAK door witrotschimmels. Op basis daarvan is tabel 8 geconstrueerd.

De reinigingsrendementen die gebaseerd zijn op praktijkervaring geven een lagere schatting dan de gevonden literatuurwaarden. Een mogelijke verklaring hiervoor ligt in de geraadpleegde literatuur, waarin zelden niet succesvol gereinigde partijen grond worden behandeld. In de volgende paragraaf zijn de waarden uit tabel 8 gebruikt om de marktpotentie van de extensieve sanering van matig verontreinigde grond in te kunnen schatten.

Tabel 8 Reinigingsrendementcriteria voor inschatting marktbehoefte Σ PAK/olie reiniging (aromaten < 10*Grenswaarde)

Reinigingsrendementen (%)								
	zand				klei			
	1 jaar		5 jaar		1 jaar		5 jaar	
	Ervaring	Literatuur	Ervaring	Literatuur	Ervaring	Literatuur	Ervaring	Literatuur
Olie (C ₁₀ -C ₄₀)	85	86-90	90	76	75	50-90	85	NB
PAK (2-3R)	80	NB	85	NB	70	NB	75	NB
PAK (4-6R)	25	NB	50	NB	25	NB	50	NB
Σ PAK (2-6R) ¹	25-80	20-95	50-85	99	25-70	76-100	50-75	NB

¹ Σ PAK(2-6R) = Σ (PAK (2-3R)+PAK(4-6R))

NB = niet bekend

5.2. Marktpotentie extensieve grondreiniging

Het SCG heeft een databestand met partijen verontreinigde grond die vanaf 1989 bij het SCG zijn gemeld. Uit dit databestand is een onderzoek verricht naar partijen die in 1995 en 1996 zijn gemeld bij het SCG. Gekozen is voor deze 2 jaren omdat in deze jaren het SCG een marktaandeel in advisering over reinigbaarheid had van ca. 75 %. De database van het SCG over 1995 en 1996 wordt daarom representatief verondersteld voor de in Nederland vrijkomende verontreinigde grond.

Beschrijving selectiestappen

- 0 Betreft een selectie uit het SCG-IS van alle gemelde partijen in de jaren 1995 en 1996
- 1 Selectie 0 verminderd met alle herbruikbare partijen
- 2 Selectie 1 verminderd met alle partijen niet zijnde grond
- 3 Selectie 2 verminderd met alle partijen grond die meer dan 20 % bodemvreemde materialen bevatten
- 4 Selectie 3 verminderd met alle partijen die meer dan 15 % organische stof bevatten
- 5a Selectie 4 verminderd met alle partijen met meer dan 50 % minerale delen < 63 μ m
- 5b Selectie 4 verminderd met alle partijen met minder dan 50 % minerale delen < 63 μ m
- 6a Selectie 5a verminderd met alle partijen met gehalten aan contaminanten boven de in de onderstaande tabel (bij 6a) aangegeven waarden
- 6b Selectie 5b verminderd met alle partijen met gehalten aan contaminanten boven de in de onderstaande tabel (bij 6b) aangegeven waarden
- 7a Selectie 5a verminderd met alle partijen met gehalten aan contaminanten boven de in de onderstaande tabel (bij 7a) aangegeven waarden
- 7b Selectie 5b verminderd met alle partijen met gehalten aan contaminanten boven de in de onderstaande tabel (bij 7b) aangegeven waarden

Over de database van 1995 en 1996 zijn een aantal selectiecriteria gelegd die verband houden

met de mogelijkheden van extensieve reiniging. Een nadere beschrijving van deze selectiecriteria is hiervoor weergegeven.

De partijen grond die overblijven na selectie 1-4 komen op basis van de eigenschappen van de grond in aanmerking voor een extensieve reinigingsvariant. Vervolgens wordt in selectie 5 een opsplitsing gemaakt tussen “makkelijke” en “moeilijke” biologische reinigbare grond zoals verwoord in hoofdstuk 1. In selectiestappen 6 en 7 wordt op basis van de reinigingsrendementen voor PAK en minerale olie zoals deze verwoord zijn in hoofdstuk 5.1 de partijen geselecteerd die op basis van de verontreinigingsconcentratie in aanmerking komen voor een extensieve reinigingsvariant. De factor maal de grenswaarde voor PAK en minerale olie, voor de selectiestappen 6 a/b en 7a/b, is afgeleid van het reinigingsrendement (tabel 8) conform de formule $[1/(1-R/100)]$, waarbij R staat voor het reinigingsrendement (in %).

In de berekening is per selectiestap aangegeven wat de hoeveelheid grond is die voldoet aan de selectiecriteria. Uit bovenstaande selectie valt op te maken dat voor zowel zandige als kleiïge grond geldt dat ca. 30 % van de niet-herbruikbare grond (zonder veel fysische bijmengingen) geschikt is voor extensieve reiniging. Uitgaande van een jaarlijkse hoeveelheid van 1,5 miljoen ton verontreinigde grond die intensief wordt gereinigd (ex-situ) kan worden verondersteld dat hiervan een deel voor een extensieve reinigingsvariant in aanmerking kan komen.

De marktverkenning is gebaseerd op gegevens uit de SCG database en een aantal selectiecriteria. De waarde van de uitkomsten van deze marktverkenning is dan ook zo groot als enerzijds de mate waarin de gegevens van het SCG representatief zijn voor in de toekomst vrijkomende grond en anderzijds als de realiteit van de selectiecriteria (met name de gehanteerde reinigingsrendementen).

Tabel 9 Selectieprocedure voor inschatting markpotentie extensieve sanering van matig verontreinigde grond

Selectie	Omschrijving	Partijen	Tonnen	Selectie	Omschrijving	Partijen	Tonnen
0	Totaal 1995 & 1996	3547	11.041.307	0	Totaal 1995 & 1996	3547	11.041.307
1	Excl. Hergebruik	3063	9.555.989	1	Excl. Hergebruik	3063	9.555.989
2	Excl. niet grond	2769	8.710.452	2	Excl. niet grond	2769	8.710.452
3	Excl. bodemvreemd	2269	7.850.103	3	Excl. bodemvreemd	2269	7.850.103
4	Excl humus > 15 %	2061	7.225.034	4	Excl humus > 15 %	2061	7.225.034
Selectie	Omschrijving	Partijen	Tonnen	Selectie		Partijen	Tonnen
5a	< 50 % -63µm	1499	5.007.181	5b	> 50 % -63 µm	562	2.217.853
6a	Geschikt 1 jaar	440	2.390.636	6b	Geschikt 1 jaar	165	887.853
7a	Geschikt 5 jaar	488	2.449.357	7b	Geschikt 5 jaar	178	922.492

Contaminant	6a	6b	7a	7b
Zware metalen	Grenswaarde	Grenswaarde	Grenswaarde	Grenswaarde
Cyanide	Streefwaarde	Streefwaarde	Streefwaarde	Streefwaarde
Aromaten	10 * Grenswaarde	10 * Grenswaarde	10 * Grenswaarde	10 * Grenswaarde
PAK 2-3 ringen	5 * Grenswaarde	3,33 * Grenswaarde	6,67 * Grenswaarde	4 * Grenswaarde
PAK > 3 ringen	1,33 * Grenswaarde	1,33 * Grenswaarde	2 * Grenswaarde	2 * Grenswaarde
Olie	6,67 * Grenswaarde	4 * Grenswaarde	10 * Grenswaarde	6,67 * Grenswaarde
Overig	Grenswaarde	Grenswaarde	Grenswaarde	Grenswaarde

5.3. Samenvatting

De praktijkervaringen van de reinigingsrendementen worden door de gevonden literatuurwaarden goed onderschreven. Op basis daarvan kan geconcludeerd worden dat de marktinschatting voor extensieve reiniging voor zowel zand als klei een redelijk goede inschatting zal geven van de marktpotentie. De marktpotentie voor extensieve reiniging van matig verontreinigde klei- en zandgrond bedraagt 0,5 miljoen ton/jaar.

Als kanttekening kan hierbij geplaatst worden dat het reinigingsrendement sterk afhankelijk is van de samenstelling en ouderdom van de verontreiniging. Er is voor het reinigingsrendement als criterium gekozen omdat deze gegevens het meest compleet waren.

Tabel 10 Reinigingsrendementcriteria voor inschatting marktbehoefte Σ PAK/olie reiniging (aromaten < 10*Grenswaarde)

Reinigingsrendementen (%)								
	zand				klei			
	1 jaar		5 jaar		1 jaar		5 jaar	
	Ervaring	Literatuur	Ervaring	Literatuur	Ervaring	Literatuur	Ervaring	Literatuur
Olie (C ₁₀ -C ₄₀)	85	86-90	90	76	75	50-90	85	NB
PAK (2-3R)	80	NB	85	NB	70	NB	75	NB
PAK (4-6R)	25	NB	50	NB	25	NB	50	NB
Σ PAK (2-6R) ¹	25-80	20-95	50-85	99	25-70	76-100	50-75	NB

¹ Σ PAK(2-6R) = Σ (PAK (2-3R)+PAK(4-6R))

NB = niet bekend

6. Risico's

Dit hoofdstuk geeft kort weer wat de risico's zijn wanneer civieltechnische constructies toegepast worden.

6.1. Risico-evaluatie reinigingsrendementen

De reinigingsrendementen die gevonden zijn in hoofdstuk 5 laten zien dat er een grote spreiding bestaat tussen de gepubliceerde resultaten. De gegevens uit de literatuur dienen dan ook met enige nuancering bekeken te worden. Het niet halen van het beoogde eindresultaat per groep verbindingen (olie, diverse PAK) is sterk afhankelijk van dit reinigingsrendement. Een overschatting van het reinigingsrendement heeft tot gevolg dat de saneringsduur zal toenemen hetgeen de kosten voor onderhoud en monitoring doet toenemen. Het verkrijgen van specifieke informatie over haalbare reinigingsrendementen, per type grond en de herkomst van de verontreiniging, moet onderdeel uitmaken van het vervolgtraject als aanvulling op de in dit rapport vermelde generieke informatie. Hiermee kan een betere inschatting worden verkregen van de benodigde reinigingsduur in een extensieve reinigingsvariant.

6.2. Risico-evaluatie omgeving (tijdens reiniging)

Op basis van de literatuur wordt aangegeven dat wanneer een bodem een organisch stofgehalte heeft dat groter is dan 0,1%, de PAK door sorptie sterk vastgehouden worden en daardoor nauwelijks het grondwater in zullen migreren (Neff, 1998). Vanuit de civieltechnische eisen is aangegeven dat het organisch stofgehalte maximaal 3% mag bedragen. Een toename in het molecuulgewicht van een PAK versterkt dit effect, waardoor migratie richting het grondwater in nog kleinere mate plaats zal vinden. Van hogere PAK wordt i.t.t. de lagere PAK dan ook verwacht dat deze geen enkel verspreidingsrisico met zich mee zal brengen. Er is dus op basis van de organische stofgegevens en PAK-samenstelling op voorhand al enigszins te voorspellen wat het uitloggedrag zal zijn. Indien toch uitloging plaatsvindt zijn PAK-verbindingen biologisch beschikbaar en zullen, indien er voldoende zuurstof aanwezig is, gemakkelijk afgebroken kunnen worden. De accumulatie van PAK-verbindingen in het grondwater blijft daarom sterk afhankelijk van de aanwezigheid van zuurstof.

Om zekerheid te krijgen omtrent de uitloging van de diverse PAK tijdens de reiniging is het vooraf testen van grondmonsters op laboratoriumschaal een noodzaak. Deze testen zijn niet genormaliseerd en worden op dit moment nog niet toegepast. Er valt daarom weinig te zeggen over de risico's die mogelijk voor kunnen doen tijdens de reiniging.

6.3. Risico-evaluatie civieltechnisch werk: stabiliteit (tijdens en na constructie)

Een aantal risico factoren met betrekking tot de stabiliteit van het werk kan op voorhand worden bepaald.

- Aanwezigheid van folie: De aanwezigheid van folie heeft geen negatieve invloed op de stabiliteit

van een werk.

- Aanwezigheid van drains: Drains en/of andere type onttrekkings- of infiltratiemiddelen hebben geen negatieve invloed op de stabiliteit van een werk.
- Onttrekken lucht: Het onttrekken van lucht en/of het creëren van aerobisch milieu kan, indien er een hoge fractie organische stof aanwezig is, een negatieve invloed hebben op de stabiliteit van het werk. Als gevolg van het aerobe milieu zal een deel van de aanwezige organische stof worden omgezet, dit kan inklinking van het materiaal tot gevolg hebben. Bij lage organische stofgehalten, hetgeen voor de meeste verontreinigde grond het geval is, is de inklinking dermate laag dat deze geen problemen op zal leveren.
- Omzetting verontreiniging: Bij het biologische afbraakproces wordt de verontreiniging omgezet in biomassa, CO₂ en water. De hoeveelheid verontreiniging is echter beperkt voor de beschreven toepassing zodat van een eventuele inklinking van de grond geen sprake is. Het gevormde CO₂ en water worden respectievelijk afgevoerd middels de luchtonttrekking en de percolatiedrains. De omzetting van de verontreiniging heeft zodoende geen negatieve invloed op de stabiliteit van het werk.
- Toevoegingen: Toevoeging in de vorm van vloeibare nutriënten hebben geen negatieve invloed op de stabiliteit. Toevoegen van organische stoffen voor de verbetering van de bodemopbouw ten behoeve van de beluchting en/of het afbraakproces, zoals compost en/of houtsnippers zullen na verloop van tijd worden omgezet. Dit kan afhankelijk van de hoeveelheid van dit materiaal leiden tot een inklinking van de grond in het werk.

De risico's op het gebied van de haalbaarheid van de civieltechnische eisen zijn sterk afhankelijk van het type werk. Indien het werk bestaat uit een voorbelasting van een ophoging of aanvulling dan worden er na afloop van de inrichting van het werk eisen gesteld met betrekking tot de verdichtingsgraad. De verdichting kan pas plaats vinden nadat het biologische proces is uitgevoerd omdat het anders nagenoeg onmogelijk is om het grondpakket in voldoende mate van zuurstof te voorzien. Het behalen van de vereiste verdichtingsgraad is mede afhankelijk van de aanwezigheid van organische stof. Organische stof verlaagt de verdichtingsgraad. Voor het behalen van de vereiste verdichtingsgraad is het van belang dat er geen additionele organische stoffen, zoals compost of zuiveringszand, voor de uitvoering van het reinigingsconcept worden toegevoegd aan de te verwerken grond.

De vereiste korrelgrootte verdeling kan op voorhand worden vastgesteld, hiervoor zijn dus geen risico's van toepassing.

Indien het werk bestaat uit bv een geluidswal worden er geen specifieke eisen gesteld aan de grond en dient met name aandacht te worden besteed aan een mogelijke inklinking als gevolg van de afbraak van organische stof.

7. Ontwerpvoorbeeld civieltechnisch werk voor extensieve reiniging

In dit hoofdstuk wordt een civieltechnisch werk voor extensieve reiniging uitgewerkt. In dit ontwerp zijn de technische voorzieningen geminimaliseerd.

7.1. Minimalisering technische voorzieningen

Uit het voorgaande blijkt dat het toevoegen van toeslagstoffen zowel kosten verhogend werkt als dat de stabiliteit van het werk negatief wordt beïnvloed. Toeslagstoffen hebben met name een gunstig effect op het reinigingsrendement op de korte termijn (weken tot maanden). Op de langere termijn (> 6 maanden) is het gunstige effect van toeslagstoffen nagenoeg afwezig. In het voorgestelde concept is de reinigingstijd van ondergeschikt belang, zodat bij dit ontwerp het toevoegen van toeslagstoffen achterwege wordt gelaten.

Het aanbrengen van een aëroob milieu in het werk is van wezenlijk belang omdat de afbraak van de verontreinigingen alleen onder deze condities verloopt. Een aëroob milieu wordt aangelegd door het toepassen van beluchting, hetgeen plaatsvindt door luchtonttrekking.

Omdat voor het toepassen van het onderhavige concept de wet- en regelgeving niet toereikend is wordt voornamelijk uitgegaan van de eisen die aan categorie 2 grond worden gesteld bij de toepassing van secundaire grondstoffen bij het ontwerp van het werk.

7.2. Ontwerp geluidswal

Het concept om grond extensief te reinigen in een civieltechnisch werk is doorgerekend voor de aanleg van een geluidswal. Voornamelijk lijkt dit de meest haalbare optie zowel vanuit financieel oogpunt als op basis van wet- en regelgeving.

Het ontwerp van de geluidswal is schematisch weergegeven in bijlage B. De geluidswal heeft een hoogte van 5 meter, een bovenbreedte van 2 meter en een talud van 1:1. Per strekkende meter geluidswal komt dit overeen met een benodigd grondoppervlak van 12 m², en een inhoud van 35 m³ (oftewel 60 ton grond). De geluidswal is opgebouwd uit 6 stuks monitoringsdrains onder de folie, folie zonder steunlaag, 6 stuks percolatiedrains en 12 luchtonttrekkingsdrains (6 aan onderzijde, 4 in het midden en 2 boven). De zuurstofvoorziening vindt plaats door lucht te onttrekken waarmee een lichte onderdruk in de geluidswal wordt aangelegd. De onttrokken lucht wordt aangevuld met zuurstofrijke omgevingslucht. Het overtollige regenwater wordt afgevoerd middels percolatiedrains en afgevoerd naar een waterzuivering.

De verschillende kostenposten kunnen worden onderscheiden:

- Eenmalige kosten voor aanleg

Folie

LDPE-folie 1 mm dik:

7,20 per m²

aanbrengen folie:

1,80 per m²

totaal folie:	9,00 per m ²	
12 m ² per strekkende meter geluidswal (60 ton)		1,80 per ton

Drains

luchtonttrekking-, percolatie en monitoringdrain: (d = 80 mm, pp 450 omhulling, incl. klikmoffen)	3,60 per m	
aanleggen van drain:	1,80 per m	
totaal drains:	5,40 per m	
24 meter drain per strekkende meter geluidswal (60 ton)		2,20 per ton

Voorbehandeling grond

kraan, shovel en mobiele zeefmachine:	4080,- per dag	
productie:	600 m ³ per dag	
totaal (1 m ³ = 1,7 ton):		4,00 per ton

Aanbrengen geluidswal

shovel en kraan:	1800,- per dag	
productie:	800 m ³ per dag	
totaal:		1,30 per ton

Indien voor de aanleg van de geluidswal een andere taludverhouding wordt aangehouden heeft dit nagenoeg geen invloed op de aanlegkosten. Indien de geluidswal minder hoog zou zijn, bv 3 meter i.p.v. 5 meter dan resulteert dit in een verhoging (voor de folie en drains) van de eenmalige kosten van circa fl 1,- per ton.

Het aanbrengen van een extra steunlaag (20 cm grof zand) bedraagt circa fl 1,- per ton grond.

- **Jaarlijkse kosten**

De kosten voor energie, onderhoud en monitoring zijn gerelateerd aan de duur van de reiniging in het werk en zijn daarom in jaarlijkse kosten weergegeven. Eenzelfde redenering is aangehouden voor de kosten met betrekking tot de luchtonttrekking en de waterzuivering. Deze middelen kunnen na afloop van het biologisch reinigingsproces in het werk op een volgend (overeenkomstig) werk worden ingezet. Bij het opstellen van de jaarlijkse kosten is uitgegaan van inrichting bestaande uit circa 10.000 ton grond

Luchtonttrekking

Luchtonttrekkingsunit bestaande uit in container geplaatste vacuumblower (500 m³/uur), voorzien van demisterpakket voor behandeling van circa 10.000 ton grond.

Investeringskosten:	40.000,-
Afschrijvingstermijn:	3 jaar
rente:	7 %
kosten per jaar:	15.000,-

Waterzuivering

Waterzuivering bestaande uit buffertanks, automatisch terugspoelbaar zandfilter en actiefkoolfilter met capaciteit van 5 m³/uur.

Investeringskosten:	70.000,-
Afschrijvingstermijn:	4 jaar

rente: 7 %
kosten per jaar: 21.000,-

Energie

Het geïnstalleerde vermogen komt grotendeels voor rekening van de vacuumblower en bedraagt maximaal 20 kW. Het geïnstalleerde vermogen bedraagt dan 0,002 kWh per ton.

Onderhoud

Voor de onderhoudskosten voor de luchtonttrekkingsunit en de waterzuivering is uitgegaan van onderhoudsfrequentie van 1 dag per maand. De onderhoudskosten hiervoor bedragen circa 8.000,- per jaar.

Monitoring

De monitoringskosten, uitgaande van een mengmonster per 500 ton en een monitoringsfrequentie van 4 keer per jaar bedragen voor een partij van 10.000 ton circa fl 20.000,- per jaar.

7.3. Samenvatting

De minimale 'kale' kosten voor de aanleg van een civieltechnisch werk voor extensieve reiniging (geluidswal) staan in tabel 11. Toeslagstoffen zijn hierbij niet inbegrepen, zuurstofdoserings in de vorm van luchtonttrekking is wel opgenomen. De eenmalige kosten zijn f9,3/ton. De jaarlijkse kosten zijn f9,0/ton. Voor het inrichten van een civieltechnisch werk met verontreinigde grond gedurende een periode van 4 jaar, komen de totale 'kale' kosten neer op f 45,3 /ton, incl. luchtonttrekkingsinstallatie.

Voor een betere performance van het civieltechnisch werk als reinigingsvariant kunnen toeslagstoffen toegevoegd worden, mits de kosten niet hoger uitvallen dan de huidige grondreinigingsprijzen. Toeslagstoffen mogen alleen worden toegevoegd wanneer aan de civieltechnische eisen wordt voldaan.

Tabel 11 Samenvatting van de uitvoeringskosten van een geluidswal met een oppervlakte volume-verhouding van 12:35.

Eenmalige kosten (fl) per ton		Jaarlijkse kosten (fl) per ton	
folie	1,80	luchtonttrekking	1,50
drains	2,20	waterzuivering	2,10
voorbehandeling	4,00	energie	2,60
aanleg	1,30	onderhoud	0,80
(steunlaag)	(1,00)	monitoring	2,00
totaal	9,30		9,00

8. Conclusie

Uit literatuuronderzoek en op basis van praktijkervaring volgt dat micro-organismen de potentie hebben om in aanwezigheid van de juiste (milieu)condities zowel minerale olie als PAK in verontreinigde grond op biologische wijze af te breken.

De vereiste condities voor een hoog verwijderingsrendement bestaan o.a. uit een voldoende biobeschikbaarheid van de verontreiniging en een aërobe milieuomstandigheden.

Op basis van de mogelijk haalbare reinigingsrendementen is er voldoende marktpotentie in Nederland om matig verontreinigde PAK-grond in civieltechnische werken extensief te reinigen.

De economische haalbaarheid is afhankelijk van enerzijds de vereiste technische voorzieningen en anderzijds de benodigde tijdsduur voor het instant houden van de technische voorzieningen in het werk.

Het toepassen van een reinigingstechniek in een civieltechnisch werk past nog niet in het huidige wettelijk kader voor het hergebruik van verontreinigde grond.

9. Vervolgtraject

Het vervolgtraject zal bestaan uit een drietal sporen die parallel kunnen worden uitgevoerd. In het eerste spoor wordt de haalbaarheid van het concept uitgetest volgens de beschreven constructie in een grootschalig pilot-experiment. Hierbij dienen o.a. aspecten als de invloed van de compactheid van de grond, en de dichtheid van de beluchtingsdrains te worden meegenomen in het vervolgonderzoek.

Het tweede spoor richt zich op de haalbaarheid van diverse typen grond en herkomst van de verontreinigingen (biobeschikbaarheid). Dit spoor heeft als doel om een matrix op te stellen waaruit de haalbaarheid en/of de niet-haalbaarheid van het beschreven concept op basis van het type grond en de verontreinigingskarakteristieken.

In het derde spoor wordt aandacht besteed aan de integratie van een norm voor de uitloging van organische verontreinigingen in het bouwstoffenbesluit. Dit traject zal in een breder kader in SKB-verband moeten worden uitgevoerd. Gegevens omtrent de uitlogbaarheid van organische verontreinigen (o.a. PAK) zijn noodzakelijk voor de uitvoering van een risico-evaluatie. Alvorens hierover gefundeerde uitspraken te kunnen doen is overigens een standarisatie van de uitvoering van uitlogonderzoek voor organische verontreinigen noodzakelijk.

Literatuur

- BIOREM. Biofeasibility study PAH case history,
http://www.bioremtechnologies.com/assets/feasibility_pah.html.
- BIOREM. Landfarming Bioremediation of PAH-contaminated Soil (ed. P. S. Owner: Ultramar Canada), http://www.bioremtechnologies.com/assets/field_study_landfarming.html.
- BIOREM. PAH Landfarming Biofeasibility Study (ed. C. U. Canada),
http://www.bioremtechnologies.com/assets/feasibility_pah2.html.
- Carmichael, L. M. & Pfaender, F. K. (1997). Polynuclear Aromatic Hydrocarbon Metabolism in Soils - Relationship to Soil Characteristics and Preexposure. *Environmental Toxicology & Chemistry* 16, 666-675.
- Commandeur, L. C. M. & Prins, R. A. (1994). Voorwaarden voor microbiële afbraak van (gehalogeneerde) koolwaterstoffen in de bodem. Technische Commissie Bodembescherming (TCB), Den Haag.
- Cutright, T. J. (1995). Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Biodegradation and Kinetics Using *Cunninghamella Echinulata* Var *Elegans*. *International Biodeterioration & Biodegradation* 35, 397-408.
- Doddema, H. (1997). .
- Dubourguier, H. C., Duval, M. N. & Deuet, S. (1995). Successful land-farming bioremediation of soils highly contaminated by coal tar residues. In *Fifth International FZK/TNO Conference on Contaminated Soil*, vol. 2. *Workshop contributions on soil remediation - bioremediation* (ed. W. J. Van den Brink, R. Bosman and F. Arendts), pp. 949-957. Kluwer Academic Publishers, Maastricht, The Netherlands.
- Durant, N. D., Wilson, L. P. & Bower, E. J. (1994). Screening for the natural subsurface biotransformation of polycyclic aromatic hydrocarbons at a former manufactured gas plant. In *Bioremediation of chlorinated and polycyclic aromatic hydrocarbons* (ed. R. E. Hinchee, A. Leesom, L. Semprini and S. K. Ong), pp. 456-461.
- Eiermann, D. R. & Bolliger, R. (1995a). Bioremediation of a PAH-Contaminated Gasworks Site with the Ebiox Vacuum Heap System. In *Third International In Situ and On-Site Bioreclamation Symposium*, vol. 3(6). *Applied Bioremediation of Petroleum Hydrocarbons*, pp. 241-248. Battelle Press, San Diego, California.
- Eiermann, D. R. & Bolliger, R. (1995b). Vacuum heap bioremediation of a PAH-contaminated gasworks site. In *Fifth International FZK/TNO Conference on Contaminated Soil*, vol. 2. *Short communications* (ed. W. J. Van den Brink, R. Bosman and F. Arendts), pp. 1189-1190. Kluwer Academic Publishers, Maastricht, The Netherlands.
- Eijsackers, H. (1994). Als de bacteriën er niet bij kunnen. *Milieumarkt* april, 23-24.
- Fuchs, W., Loibner, A. P., Klinitisch, A., Gartner, M. & Braun, R. (1995). Bioremediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons. In *Fifth International FZK/TNO Conference on Contaminated Soil*, vol. 2. *Short communications* (ed. W. J. Van den Brink, R. Bosman and F. Arendts), pp. 1209-1212. Kluwer Academic Publishers, Maastricht, The Netherlands.

- Hamel, S. E. (1997). Microbiologische afbraak van polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAK): Een voorspelbaar proces? Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ).
- Harkes, M. (1998). .
- Haight, R. C., Neogy, R., Vonderhaar, S. S., Krishnan, E. R., Safferman, S. I. & Ryan, J. (1995). Land Treatment Alternatives For Bioremediating Wood Preserving Wastes. *Hazardous Waste & Hazardous Materials* 12, 329-344.
- Huling, S. G., Pope, D. F., Matthews, J. E., Sims, J. S., Sims, R. C. & Sorenson, D. L. (1995). Wood preserving waste-contaminated soil: treatment and toxicity response. In *Third International In Situ and On-Site Bioreclamation Symposium*, vol. 3(7). *Bioremediation of recalcitrant organics*, pp. 101-109. Battelle Press, San Diego, California.
- Kastner, M., Breuerjammali, M. & Mahro, B. (1998). Impact of Inoculation Protocols, Salinity, and Ph On the Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (Pahs) and Survival of Pah-Degrading Bacteria Introduced Into Soil. *Applied & Environmental Microbiology* 64, 359-362.
- Ligtvoet, A. C. P. & Schmal, D. (1992). In-situ electrochemical hydrogen peroxide generation. TNO Environmental Sciences, Energy Research and Process Innovation, Apeldoorn.
- Meulenberg, R., Rijnaarts, H. H. M., Doddema, H. J. & Field, J. A. (1997). Partially oxidized polycyclic hydrocarbons show an increased bioavailability and biodegradability. *FEMS Microbiology Letters* 152, 45-49.
- Mohammed, N., Allayla, R. I., Nakhla, G. F., Farooq, S. & Husain, T. (1996). STATE-OF-THE-ART REVIEW OF BIOREMEDIATION STUDIES [Review]. *Journal of Environmental Science & Health, Part A: Environmental Science & Engineering & Toxic & Hazardous Substance Control* 31, 1547-1574.
- Myers, J. M., Banipal, B. S. & Fisher, C. W. (1995). Biodegradation of Oil Refinery Wastes. In *Third International In Situ and On-Site Bioreclamation Symposium*, vol. 3(6). *Applied Bioremediation of Petroleum Hydrocarbons*, pp. 445-451. Battelle Press, San Diego, California.
- Neff, J. M. (1998). Ecorisk of PAHs in subsurface soils: estimating transport (Ecological Risk Assessment). In *The first international conference on remediation of chlorinated and recalcitrant compounds*, vol. 1. *Risk, Resource, and Regulatory Issues* (ed. G. B. Wickramanayake and R. E. Hinchey), pp. 139-143. Batelle Press, Monterey, California.
- Pardieck, D. L., Bouwer, E. J. & Stone, A. T. (1992). Hydrogen peroxide use to increase oxidant capacity for in situ bioremediation of contaminated soils and aquifers; A review. *Journal of Contaminant Hydrology* 9, 221-242.
- Pott, B. M. & Henrysson, T. (1995). Ex situ bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons in laboratory systems. In *Third International In Situ and On-Site Bioreclamation Symposium*, vol. 3(7). *Bioremediation of recalcitrant organics*, pp. 39-44. Battelle Press, San Diego, California.
- Ramaswmi, A., Ghoshal, S. & Luthy, R. G. (1994). MASS TRANSFER AND BIODEGRADATION OF PAH COMPOUNDS FROM COAL TAR [Review]. *Water Science & Technology* 30, 61-70.
- Schaefer, G., Hattwig, S., Unterste-Wilms, M., Hupe, K., Heerenklage, J., Lüth, J. C., Kästner, M., Eschenbach, A., Stegmann, R. & Mahro, B. (1995). PAH-degradation in soil: Microbial activation or inoculation?

- A comparative evaluation with different supplements and soil materials. In *Fifth International FZK/TNO Conference on Contaminated Soil*, vol. 1. *Short communications* (ed. W. J. Van den Brink, R. Bosman and F. Arendts), pp. 415-416. Kluwer Academic Publishers, Maastricht, The Netherlands.
- Schulz-Berendt, V. & Poetzsch, E. (1995). Large-Scale Experience with Biological Treatment of Contaminated Soil. In *Third International In Situ and On-Site Bioreclamation Symposium*, vol. 3(6). *Applied Bioremediation of Petroleum Hydrocarbons*, pp. 219-224. Battelle Press, San Diego, California.
- Technology Innovation Office, O. o. S. W. a. E. R., United States Environmental Protection Agency (US-EPA). (1995). Cost and Performance Report: Land Treatment at the Scottt Lumber Company Superfund Site, Alton, Missouri, <http://clu-in.com/scott.html>.
- Trzesickamlynarz, D. & Ward, O. P. (1996). Degradation of Fluoranthene in a Soil Matrix By Indigenous and Introduced Bacteria. *Biotechnology Letters* 18, 181-186.
- van Afferden, M., Beyer, M. & Klein, J. (1992). Significance of bioavailability for the microbial remediation of PAH-contaminated soils. In *10th DECHEMA Annual Meeting of Biotechnologists*, vol. 5. *Bioprocess Engineering, Monitoring and Controlling, Applied Genetics and Safety, Low Molecular Weight Metabolites, Environmental Biotechnology*, pp. 605-610. Weinheim: VCH, 1993.
- Volkering, F. (1996). Bioavailability and biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons. PhD-thesis thesis.
- Wischmann, H. & Steinhart, H. (1997). The Formation of Pah Oxidation Products in Soils and Soil/Compost Mixtures. *Chemosphere* 35, 1681-1698.
- Würdemann, H., Lund, N. C. & Gudehus, G. (1995). Assessment of a biological *in-situ* remediation - Results of a field experiment at a former gaswork site. In *Fifth International FZK/TNO Conference on Contaminated Soil*, vol. 2. *Remediation of contaminated soil* (ed. W. J. Van den Brink, R. Bosman and F. Arendts), pp. 823-831. Kluwer Academic Publishers, Maastricht, The Netherlands.
- Yeom, I. T., Ghosh, M. M. & Cox, C. D. (1996). Kinetics aspects of surfactant solubilization of soil-bound polycyclic aromatic hydrocarbons. *Environmental Science & Technology* 30, 1598-1595.
- Yeom, I. T., Ghosh, M. M., Cox, C. D. & Robinson, K. G. (1995). Micellar Solubilization of polycyclic aromatic hydrocarbons in coal tar-contaminated soils. *Environmental Science & Technology* 29, 3015-3021.

BIJLAGE A OVERZICHTSTABEL PAK-afbraak

Zand	Silt	Klei	Ora. Stof	Σ[PAK]		[PAK]		tijd	Σ[PAK] verw.	[PAK] verw.	t0.5	[Olie]	tijd	[Olie] verw.	t0.5	Historie (gasfabriek, creosoteerbedrijf, etc.)	Schaal (lab-, pilot-, full-scale)	(extra) nutriënten (O ₂ , N-bron)	(extra) micro-organismen (bacteriën, schimmels)	omstandigheden (T, pH, vochtgehalte)	referentie	
				begin	eind	begin	eind															begin
(%)	(%)	(%)	(%)	(g/kg)	(g/kg)	(g/kg)	(g/kg)	(%)	(%)	(g/kg)	(g/kg)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
				2032	185	1382 (2R) 582 (3R) 70.5 (4R)	0 (2R) 142 (3R) 43.5 (4R)	25 w	90.9	100 (2R) 75.6 (3R) 38.3 (4R)						koolteer fabriek/ houtbeschermings- fabriek	Lab (toevoeging PAK)			Omgevingstempe- ratuur	(Wischmann & Steinhart, 1997)	
			13.2	25.4	3.09	11.12 (2R) 5.3 (3R) 4.5 (4R) 1.56 (5R) 0.93 (6R)	1.01 (3R) 1.72 (4R) 0.26 (5R) 0.13 (6R)	8 w	88	100 (2R) 81 (3R) 62 (4R) 83 (5R) 86 (6R)						gasfabriek	Lab	N, P, H ₂ O ₂	Schimmel C. echinulata		(Cutright, 1995) OPM: Afbraak PAK naar aantal ringen (Hierbij waarden MS1 tot MS3 gemiddeld)	
93,9	6,0	0,1	0,9	2420 mg/kg	158 mg/kg			25 d	93							geological soil layer	lab	+ glucose	+ bacteriën	10% w/w, 22 °C	(van Afferden, Beyer & Klein, 1992)	
90	8	2	2.5	1571 ppm				8 w		30-65 (3+4R) 1-3 (5R)						St Louis Park MN (subsurface) (SWS)	Lab (14C)			pH 8.3	(Carmichael & Pfaender, 1997)	
90	4	5	4.6	11 ppm				8 w		25-50 (3+4R)						Cantonment. FL. USA (surface) (DCC)	Lab (14C)			pH 6.3	(Carmichael & Pfaender, 1997)	
87	6	7	2.6	2 ppm				8 w		25-50 (3+4R) 9 (5R)						Cantonment. FL. USA (surface) (DCU)	Lab (14C)			pH 6.3	(Carmichael & Pfaender, 1997)	
78,7	20,0	1,3	9,8	2062 mg/kg	863 mg/kg			25 d	58							former coking plant	lab	+ glucose	+ bacteriën	10% w/w, 22 °C	(van Afferden <i>et al.</i> , 1992)	
68,4	30,3	0,7	5,5	241 mg/kg	231 mg/kg			25 d	4							former coking plant	lab	+ glucose	+ bacteriën	10% w/w, 22 °C	(van Afferden <i>et al.</i> , 1992)	
58	34	8	2.9	269 ppm				8 w		60 (3R) 2-10 (4+5R)						St Louis Park MN (surface) (SSC)	Lab (14C)			pH 7.8	(Carmichael & Pfaender, 1997)	
53	12	35	26	2-32				8 m	95-97							voormalige kolenfabriek	lab	+ O ₂ maïsvocht+pulp, (+ maïsvocht, aardappelpulp, tarwevocht+pulp)	± micro-organismen	25 °C, verzadigde lucht, pH 7.8-9.6	(Dubourguier, Duval & Deut, 1995) OPM. nauwelijks verschil toevoegingen	
zand/lee m				200-1800 (natuurlijk)				6 m.	70-90							"Veringstrasse-site"	lab (bioreactor)	+ O ₂ , ± stro, ± compost	± schimmel	-	(Schaefer <i>et al.</i> , 1995)	
zand (Ah- horizon)				1100 (natuurlijk + kunstmatig)				3 m	95							"Veringstrasse-site"	lab (bioreactor)	+ O ₂ , ± compost, ± "Veringstrasse- site" bodem	± "Veringstrasse- site" bodem (geactiveerde micro- organismen)	-	(Schaefer <i>et al.</i> , 1995)	
zand		klei	1,9			11 mg/kg (2R)	0 mg/kg (2R)	80 d		100							lab (bioreactor)	+ O ₂		-18, +25 °C 11-14% vocht	(Pott & Henrysson, 1995)	
7	70	23	2.4	0.082 ppm				8 w	1-5							Bozeman MT, USA (surface) (BOZ)	Lab (14C)			pH 6.0	(Carmichael & Pfaender, 1997)	
34,2	60,8	5,0	1,0	162 mg/kg	24 mg/kg			25 d	85							geological soil layer	lab	+ glucose	+ bacteriën	10% w/w, 22 °C		
								30 d		55-60 (2R)						kolen-teer	Lab					(Ramaswmi, Ghoshal & Luthv, 1994)
29	39	32			2162 mg/kg			33 w	gem. 85	gem. 93 (2R) 88 (3R) 87 (4R) 45 (5R)						Houtbeschermings- fabriek, Kentucky	Lab		<i>P. sordida</i> <i>P. chrysosporium</i>		(Haught <i>et al.</i> , 1995) OPM. Tabel 2 (condities), tabel 3 (afz. result.)	
						0.058 mg/l (2R)					3.3 d						Lab	O ₂				(Commandeur & Prins, 1994) OPM: p.37-41
						155 mg/l (2R)					1.5 d						Lab	O ₂				(Commandeur & Prins, 1994)
						11.2 mg/l (3R)					132 d						Lab	O ₂			7.1, 23°C	(Commandeur & Prins, 1994)
						4400 mg/l (3R)					287.5 d						Lab	O ₂				(Commandeur & Prins, 1994)
						1 mg/l (3R)					37.9 d						Lab	O ₂			6.8, 25°C	(Commandeur & Prins, 1994)
						310 mg/l (3R)					3.8 d						Lab	O ₂				(Commandeur & Prins, 1994)
						800 mg/l (3R)					152.8 d						Lab	O ₂		<i>Alcaligenes sp.</i>		(Commandeur & Prins, 1994)
						2800 mg/l (3R)					8.5 d						Lab	O ₂		<i>Alcaligenes sp.</i>		(Commandeur &

BIJLAGE B ONTWERP VAN EEN GELUIDSWAL

45

45

45

45