Programma Ontwikkeling Saneringsprocessen Waterbodems (POSW)
Fase II (1992-1996)

Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA)
Postbus 17, 8200 AA Lelystad 0320-298533

BIOLOGISCHE TECHNIEKEN VOOR REINIGING VAN BAGGERSPECIE. EINDRAPPORT

auteur: M. Ferdinandy, RIZA
redactie: W. Verhoog, Bureau Maurits Groen

opdrachtgever:
Rijkswaterstaat:
Programma Ontwikkeling Saneringsprocessen Waterbodems (POSW)

juli 1999

RIZA rapport: 97.083
ISBN: 90 369 51 305

Voorwoord

Doelstelling van POSW (Programma Ontwikkeling Saneringsprocessen Waterbodems, 1989 - 1997) was de ontwikkeling en operationalisering van technieken voor baggeren en verwerken van verontreinigde waterbodems. Behalve de technologie, vormden kosten en milieueffecten punten van aandacht.

Voor u ligt het eindrapport biologische reiniging van POSW. Dit rapport geeft een overzicht en evaluatie van de ontwikkelingsprojecten die binnen het POSW ten aanzien van biologische technieken zijn uitgevoerd. Voor de toegankelijkheid naar een breed publiek is het voorliggende *eind*rapport sterk samenvattend. Meer details worden in het *basis*rapport biologische reiniging [1] gegeven. Daarnaast zijn van de circa dertig projecten, die in dit kader zijn uitgevoerd, *deel*rapporten geschreven door de verschillende uitvoerders (universiteiten, onderzoeksinstellingen, ingenieursbureaus en aannemers). Biologische reiniging komt eveneens aan de orde in de Haalbaarheidsstudie Grootschalige Verwerking Baggerspecie [2] en het POSW-brede Eindrapport [3].

Biologische technieken kunnen ingezet worden voor de aanpak van met organische verbindingen (minerale olie, PAK's, PCB's en chloorbenzenen) verontreinigde waterbodems. Deze stoffen worden door micro-organismen (bacteriën of schimmels) afgebroken, mits een voor de organismen geschikt leefmilieu aanwezig is. In de techniekontwikkeling is daarom veel aandacht geschonken aan het zo kosteneffectief mogelijk aanbrengen van de juiste condities. Een belangrijk punt daarbij was het inbrengen van zuurstof (lucht) in de anaërobe waterbodem. Uiteindelijk zijn de diverse technieken binnen vier biotechnologische concepten gegroepeerd.

Het concept *Reiniging in Situ* is gericht op reiniging van de waterbodem ter plekke, door toevoeging van preparaten aan de waterbodem voor de afbraak van slib, PAK's en minerale olie. Deze uitvoeringsvorm bleek niet doelmatig te zijn, door gebrek aan efficiënte inbreng van zuurstof in de bodem.
Het concept *Reiniging in Depot* wordt als perspectiefvol omschreven, maar behoeft nog verder onderzoek. Het concept is gericht op de afbraak van gechloreerde verbindingen, waarvoor éérst een anaërobe (zuurstofloze) en dan een aërobe (zuurstofrijke) omgeving vereist is. Het zuurstofloze deel kan tijdens berging in depot plaats vinden, waarbij de verblijftijden tussen de 5 en 10 jaar kunnen liggen.
De concepten *Reiniging in Landfarms en in Reactoren* zijn beide operationeel en kennen meerdere uitvoeringsvormen. De concepten zijn gericht op ex-situ afbraak van PAK en minerale olie. Bij landfarming wordt de specie in dunne lagen over speciaal daarvoor ingerichte terreinen verspreid, zodat na ontwatering lucht in de poriën kan binnendringen. Bij reactoren wordt de specie (ongescheiden of alleen de fijne fractie) verdund met water, geroerd, verwarmd en mechanisch belucht. Bij landfarming is het ruimtebeslag relatief groot en het energieverbruik relatief laag. Bij bioreactoren is dit precies andersom. In vergelijking met niet-biologische verwerkingstechnieken is het energieverbruik ook bij bioreactoren gering. De kosten voor landfarming en bioreactoren liggen rond de fl. 45,- , respectievelijk fl. 60,- per ton droge stof.

De hoofdconclusie is dat landfarm- en reactortechnieken operationeel zijn en klaar voor verdere optimalisering in de markt. Deze concepten bieden een goede, milieuvriendelijke en betaalbare oplossing voor met PAK en olie verontreinigde baggerspecie. Het bereiken van het volgens het Bouwstoffenbesluit toegestane gehalte aan minerale olie, kan voor sommige species een probleem zijn. Deze norm wordt mogelijk in de toekomst aangepast, op basis van de ecotoxicologische effecten van de diverse olieketens.

Met dank aan de Adviesgroep Biologisch Reinigen POSW en de uitvoerende partijen;

Namens POSW-II;
dr. M. M. A. Ferdinandy, juli 1999
RIZA, POSW

Inhoud

0. LEESWIJZER **7**

1. ALGEMENE INLEIDING **9**

1.1 DE WATERBODEMPROBLEMATIEK EN POSW 9

1.1.1 De waterbodemproblematiek *9*

1.1.2 Het POSW-programma *9*

1.2 BIOLOGISCHE REINIGING, PRINCIPE EN CONCEPTEN 10

1.2.1 Principe van biologische reiniging *10*

1.2.2 Technologische concepten *12*

2. TECHNOLOGISCHE ASPECTEN EN PRESTATIES **15**

2.1 REINIGING IN SITU 17

2.1.1 Inleiding *17*

2.1.2 Onderzoeksprojecten *17*

2.1.3 Literatuurstudie *18*

2.1.4 Samenstelling producten *18*

2.1.5 Laboratorium- en veldtesten *18*

2.1.6 Wvo-advies en vervolgonderzoeken *20*

2.1.7 Conclusies en aanbevelingen *20*

2.2 REINIGING IN DEPOT 23

2.2.1 Inleiding *23*

2.2.2 Onderzoeksprojecten *24*

2.2.3 Praktijkproef *24*

2.2.4 Aanvullend onderzoek *25*

2.2.5 Conclusies en aanbevelingen *26*

2.3 REINIGING IN LANDFARMS 29

2.3.1 Inleiding *29*

2.3.2 Onderzoeksprojecten *30*

2.3.3 Intensieve landfarming *31*

2.3.4 Extensieve landfarming *33*

2.3.5 Kasfarming *34*

2.3.6 Conclusies en aanbevelingen *34*

2.4 REINIGING IN REACTOREN 37

2.4.1 Inleiding *37*

2.4.2 Onderzoeksprojecten *38*

2.4.3 Beluchtingsbassin *38*

2.4.4 Slurry Decontamination Process *40*

2.4.5 Conclusies en aanbevelingen *41*

3. TOEPASBAARHEIDSASPECTEN **43**

3.1 PRODUCTKWALITEIT EN MARKTPOTENTIE 45

3.1.1 Inleiding *45*

3.1.2 Voorspelbaarheid resultaten *45*

3.1.3 Productkwaliteit *46*

3.1.4 Potentiële markt *49*

3.1.5 Conclusies en Aanbevelingen *50*

3.2 KOSTEN 53
3.2.1 Inleiding *53*
3.2.2 Uitgangspunten *53*
3.2.3 Berekende verwerkingskosten *54*
3.2.4 Consequenties voor de techniekkeuze *54*
3.2.5 Conclusies en aanbevelingen *55*
3.3 MILIEU-EFFECTEN 57
3.3.1 Inleiding *57*
3.3.2 Milieubeoordeling binnen POSW *58*
3.3.3 Milieuaspecten van biologische technieken *59*
3.3.4 Conclusies en aanbevelingen *64*

4. SAMENVATTING EN EVALUATIE 65

4.1 TECHNIEKEN 65
4.2 VERBLIJFTIJDEN EN PRODUCTKWALITEIT 65
4.3 KOSTEN EN MILIEU-ASPECTEN 65
4.4 TECHNIEKKEUZE 66
4.5 CONCLUSIES 67

5. REFERENTIES 69

6. BIJLAGEN 71

6.1 OVERZICHT VAN POSW PROJECTEN BIOLOGISCHE REINIGING 73
6.2 MILIEU-ASPECTEN BIJ REINIGING VAN PETROLEUMHAVENSPECIE MET DIVERSE BIOLOGISCHE TECHNIEKEN 75
6.3 MILIEU-ASPECTEN BIJ LANDFARMING VAN 4 SOORTEN SPECIES 77

0. LEESWIJZER

Hoofdstuk 1. In dit hoofdstuk wordt eerst een korte toelichting gegeven op de problematiek van de verontreinigde waterbodems. Daarop volgt informatie over het onderzoeksprogramma POSW en het programmadeel biologisch reinigen. Het hoofdstuk bevat ook een algemene inleiding tot biologische reiniging (principe, technische concepten en karakteristiek patroon) en daarin te onderscheiden deelconcepten.
In bijlage 1 wordt een overzicht gegeven van de projecten die binnen het programmadeel biologisch reinigen zijn uitgevoerd.

Hoofdstuk 2. Dit hoofdstuk behandelt verschillende biologische reinigingsconcepten. Elke paragraaf start met een inleiding ter nadere toelichting van het desbetreffende concept. Vervolgens wordt een overzicht gegeven van onderzoeken die binnen dit concept zijn uitgevoerd. Daarop volgend worden per onderzoek (of onderscheiden cluster van onderzoeken) resultaten gepresenteerd en conclusies getrokken. De conclusies komen deels terug in het samenvattende deel 'Conclusies en aanbevelingen' waarmee elke paragraaf wordt afgesloten.

Hoofdstuk 3. Hoewel technologische aspecten en prestaties van reinigingstechnieken (hoofdstuk 2) de toepassings-mogelijkheden van een techniek primair bepalen, spelen voor daadwerkelijke toepassing ook kosten, milieu-effecten en de uiteindelijke productkwaliteit en de afzetbaarheid in de markt, een rol. In dit hoofdstuk worden in een aantal paragrafen de belangrijkste van deze 'toepassingsaspecten' besproken: productkwaliteit en marktpotentie, kosten en milieu-effecten.

Hoofdstuk 4. Dit hoofdstuk geeft een samenvatting en een evaluatie van de informatie uit voorgaande hoofdstukken.

1. ALGEMENE INLEIDING

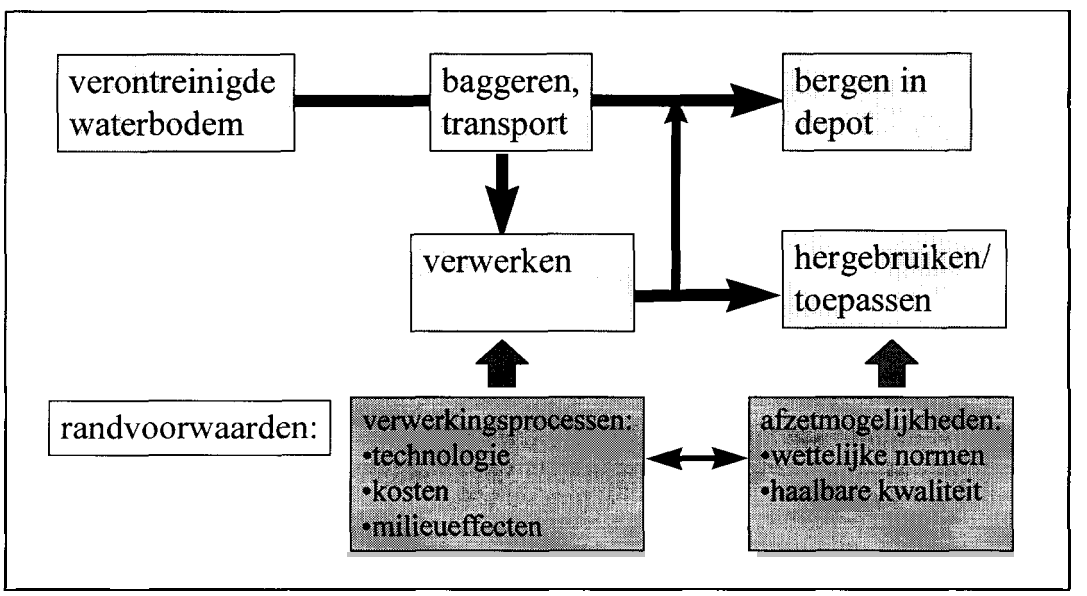
1.1 De waterbodemproblematiek en POSW

1.1.1 De waterbodemproblematiek

In Nederland, sedimentatiegebied voor de grote rivieren, moeten vaarwegen en havens op diepte worden gehouden door baggeren. Dit baggeren resulteert in het vrijkomen van grote hoeveelheden 'onderhoudsspecie'. Die specie kreeg in het verleden tal van nuttige bestemmingen tot -in de jaren tachtig- bleek dat de baggerspecie in veel gevallen verontreinigende stoffen bevatte. Ook werd duidelijk dat diverse locaties zo verontreinigd waren dat daar ook zonder nautische aanleiding gebaggerd zou moeten worden om het risico voor het milieu weg te nemen. In dergelijke gevallen bestond dus een milieuhygiënische noodzaak om tot verwijdering over te gaan. Het daarbij vrijkomende materiaal werd aangeduid als saneringsspecie.

Het vigerende beleid ten aanzien van de waterbodems is gebaseerd op de derde Nota Waterhuishouding (NW-3) [4] en de Evaluatie Nota Water (ENW) [5]. Volgens deze informatiebronnen zal tot het jaar 2010 (uit onderhoud en sanering) een totale hoeveelheid verontreinigde specie van naar verwachting 235 miljoen kubieke meter vrijkomen. In figuur 1 worden mogelijke routes voor de aanpak van de vrijkomende specie gegeven.

Figuur 1: Routes voor de aanpak van verontreinigde waterbodems.



De optie om deze specie gecontroleerd te *bergen* kent nadelen in de vorm van ruimtebeslag en de noodzaak van lange nazorg. Vanuit het milieubeleid heeft deze optie niet de voorkeur. Een alternatief vormt verwerking tot een herbruikbaar of toepasbaar product, met als bijkomend voordeel dat minder primaire grondstoffen gewonnen hoeven te worden (figuur 1).

1.1.2 Het POSW-programma

Het Programma Ontwikkeling Saneringsprocessen Waterbodems (POSW) werd in het leven geroepen door het Ministerie van Verkeer en Waterstaat. Het programma zou duidelijk moeten maken of verwerking van baggerspecie een toepasbaar alternatief is voor het storten in grootschalige depots, dit overeenkomstig de geformuleerde beleidsvoorkeuren.

POSW was ingericht in drie werkgroepen die zich bezighielden met inventarisatie, selectie, ontwikkeling en opschaling van verwerkingstechnieken (Werkgroep Techniek operationalisering), met het testen van voldoende ver ontwikkelde technieken in demonstratie-saneringen (Werkgroep Pilotsaneringen) en met de uniforme beoordeling van verschillende verwerkingstechnieken en -ketens op milieu-effecten en kosten (Werkgroep Beoordeling).

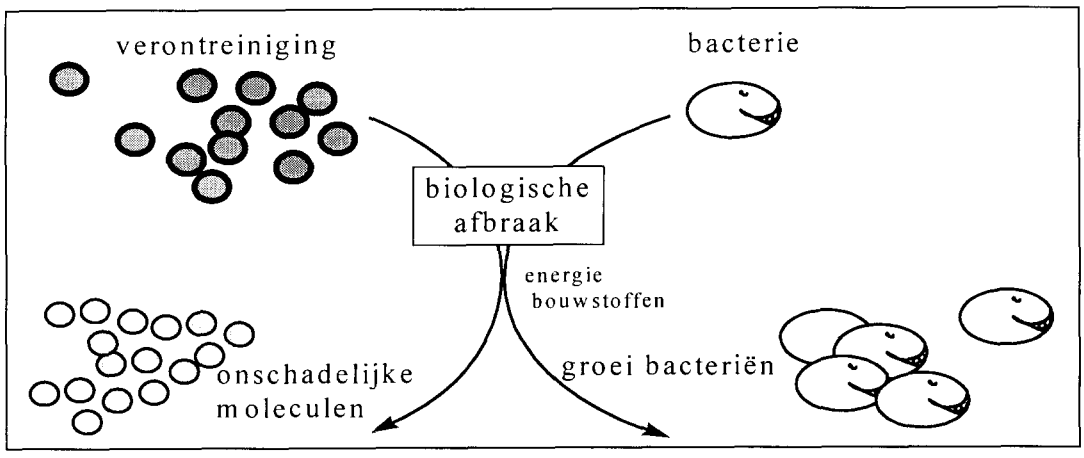
Binnen de werkgroep Techniek-operationalisering fungeerden verschillende projectgroepen die tot doel hadden de verschillende deelprojecten binnen de te onderscheiden verwerkingsalternatieven inhoudelijk te begeleiden. Een ervan was de projectgroep Biologisch Reinigen. In dit rapport worden de resultaten van deze projectgroep samenvattend weergegeven. De tabel in bijlage 1 geeft een overzicht van de uitgevoerde projecten. In paragraaf 1.2 wordt nader ingegaan op het principe en de uitvoeringsconcepten van biologische reiniging.

1.2 Biologische reiniging, principe en concepten

1.2.1 Principe van biologische reiniging

Biologische reiniging is gebaseerd op het vermogen van bacteriën en schimmels om bepaalde soorten verontreinigende stoffen af te breken tot kleinere onschadelijke moleculen. Verontreinigende stoffen vormen daarbij het 'voedsel' (leverancier van bouwstenen en/of energie) voor deze organismen (figuur 2). Bij volledige omzetting tot koolzuur en water en andere anorganische verbindingen, wordt gesproken van 'mineralisatie'.

Figuur 2: Het principe van biologische reiniging

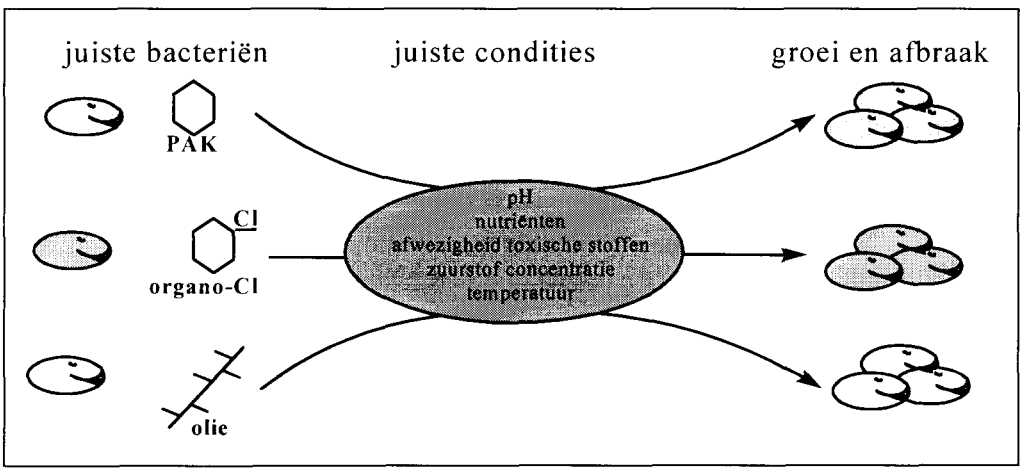


Voor een biologische afbraak moeten stoffen ten eerste biologisch afbreekbaar zijn. Daarnaast moeten ook de juiste bacteriën in voldoende grote getale aanwezig zijn en moeten andere omstandigheden een goed leefmilieu voor de organismen vormen.

Verontreinigende *organische* stoffen zijn in principe biologisch afbreekbaar. Momenteel is bekend dat minerale olie, Polycyclische Aromatische Koolwaterstoffen (PAK) en gechloreerde verbindingen als Polychloorbifenylen (PCB's) en chloorbenzenen biologisch afgebroken kunnen worden. Metalen, daarentegen, kunnen niet worden afgebroken. De op deze stoffen berustende milieubezwaarlijkheid van species valt alleen te verminderen door verwijdering (extractie, eventueel met zuurproducerende bacteriën [6]) of vastlegging (immobilisatie) van metalen.
Biologische verwerking van de specie is dus alleen zinvol indien het gehalte aan metalen de normen voor toepassing of hergebruik niet in de weg staan. Hoewel combinatieverontreiniging (organische verontreiniging

plus metalen) veel voorkomt, is de bewerking in principe toepasbaar op een substantieel deel van de Nederlandse verontreinigde waterbodems (zie par. 3.1).
Wat betreft de aanwezigheid van bacteriën is gebleken dat de juiste bacteriën vaak al in kleine getale en in inactieve vorm in de baggerspecie aanwezig zijn. Door het aanleggen van de gewenste procescondities kunnen populaties snel groeien. Versnelling met behulp van entmateriaal is eventueel mogelijk.

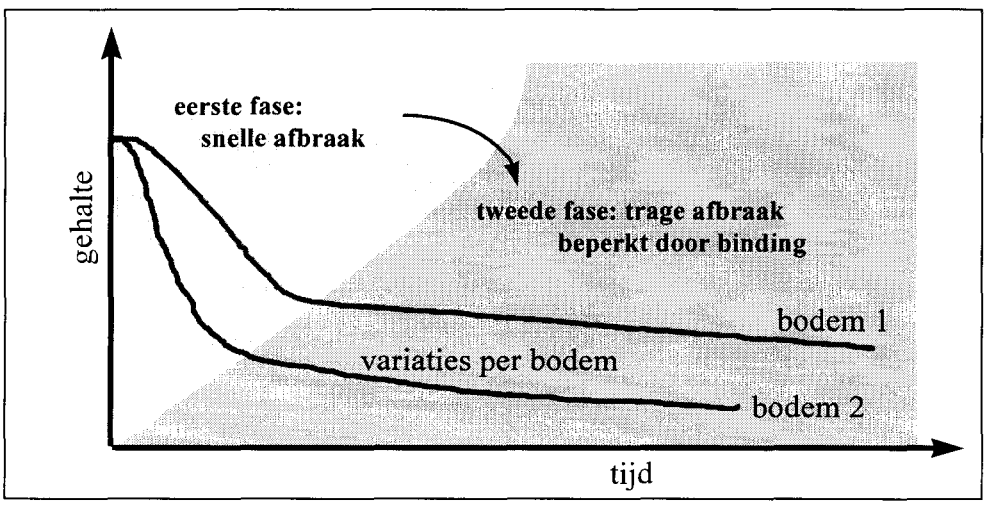
Figuur 3: Randvoorwaarden voor biologische afbraak



De eisen die de micro-organismen aan hun leefmilieu stellen verschillen per soort organisme en soort stof dat moet worden afgebroken. De ontwikkeling van biologische technieken komt neer op het efficiënt aanbrengen en in stand houden van de juiste omgevingscondities. Belangrijk zijn temperatuur (30-35 °C is vaak het optimum), aanwezigheid (of afwezigheid) van zuurstof en de aanwezigheid van voedingsstoffen (nutriënten en koolstof- en energiebronnen, soms de verontreinigende stof zelf). Een extreme zuurgraad en de aanwezigheid van toxische stoffen kunnen een remmende invloed hebben op de afbraak van stoffen. Datzelfde geldt voor de wijze van voorkomen van stoffen in de bodemmatrix.

In experimenten wordt steeds een karakteristiek verloop in de biologische afbraak gevonden (figuur 4). Na een fase met snelle afbraak volgt een (zeer) trage afbraak. Door bindingsmechanismen kunnen verontreinigende stoffen op meerdere wijzen in de specie voorkomen: in opgeloste vorm (in de waterfase), aan/in het materiaal zelf gebonden of als afzonderlijke deeltjes. Veelal gaat het om een combinatie van deze vormen.

Figuur 4: Karakteristiek beeld biologische reiniging bodems.



Bacteriën 'voeden' zich in de eerste fase met dat deel van de verontreinigende stoffen dat direct beschikbaar is of licht aan de specie is gebonden. Vervolgens (tweede fase) worden ze afhankelijk van de snelheid waarmee de sterker gebonden stoffen vrijkomen (desorptie) en zo voor afbraak beschikbaar worden.
Deze desorptie kan zo traag verlopen dat de reiniging na de eerste fase wordt gestopt, zonder dat het geformuleerde sanerings-/reinigingsdoel is bereikt. Optimalisatie van het afbraakproces blijkt in de praktijk echter mogelijk te zijn.De bindingsmechanismen (en dientengevolge de afbraak) zijn afhankelijk van een groot aantal karakteristieken van de verontreiniging en van de sedimentdeeltjes. Door het samenspel van deze factoren kan de afbraak in twee species een sterk verschillend verloop hebben, ook als ze met dezelfde stoffen en in gelijke mate (beginconcentraties) verontreinigd zijn.

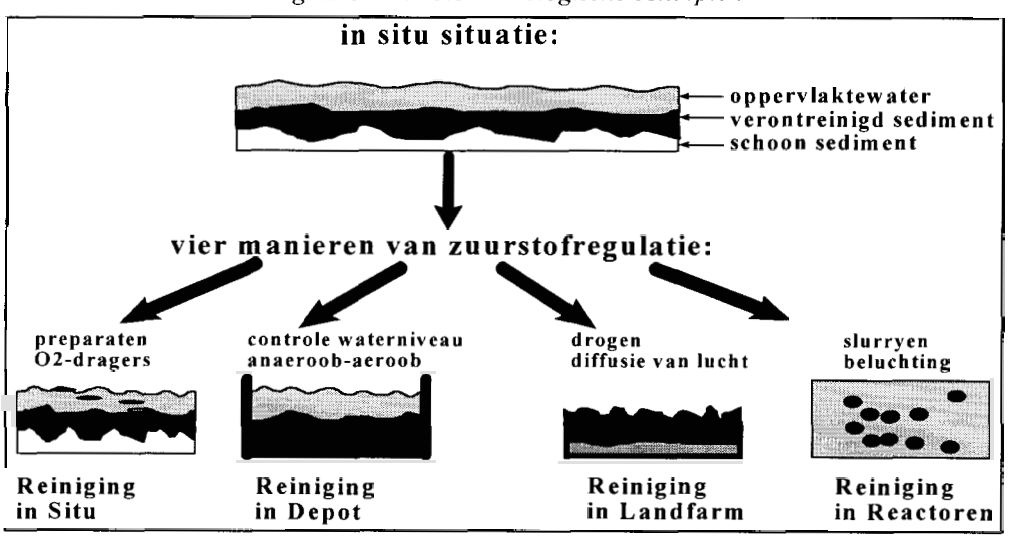
Hoewel een aantal voor de afbraaksnelheid belangrijke factoren bekend is, is het inzicht (in de onderlinge samenhang) nog onvoldoende om op basis daarvan een nauwkeurige voorspelling te kunnen doen van de snelheid en het eindresultaat van de behandeling. Wel kunnen de resultaten van biodegradatieproeven (in het laboratorium en onder optimale condities) binnen marges worden geëxtrapoleerd naar de haalbare resultaten met diverse technieken. In paragraaf 3.1 wordt nader op de voorspelbaarheid van de resultaten ingegaan.

1.2.2 Technologische concepten

Om het biologische afbraakprincipe optimaal doelmatig toepasbaar te maken voor de aanpak van verontreinigde waterbodems, is in het ontwikkelingstraject gezocht naar kosten-efficiënte methoden voor het aanleggen van de gewenste omgevingscondities voor de organismen. De belangrijkste omgevingsfactoren zijn de temperatuur en de beluchting. Deze condities zijn door de wijze van uitvoering te optimaliseren.

Met betrekking tot de gewenste temperatuur, kan gekozen worden tussen reiniging in het (warme) zomerseizoen, of het verhogen van de temperatuur binnen de reinigingsinstallaties.
Het sediment is van nature zuurstofloos. Voor de afbraak van olie en PAK, waarvoor de aanwezigheid van zuurstof vereist is, moeten condities worden geschapen waarbij de lucht de specie kan binnendringen of moet de specie actief belucht worden. De afbraak van gechloreerde verbindingen vraagt aanvankelijk juist zuurstofloze condities (dechloreringsstap), waarna de dechloreringsproducten in *aan*wezigheid van zuurstof gemineraliseerd kunnen worden (mineralisatiestap). Binnen POSW worden, op basis van de wijze waarop het zuurstofgehalte geregeld wordt, vier biotechnologische concepten onderscheiden: reiniging in situ, reiniging in depot, reiniging in landfarm en reiniging in reactoren (figuur 5).

Figuur 5: Vier biotechnologische concepten



Reiniging in situ, zoals onderzocht binnen POSW, is bedoeld voor de afbraak van PAK en olie en reductie van de sliblaagdikte. Het proces vindt ter plekke in de waterbodem plaats (in situ) door toedienen van preparaten. Omdat baggeren en transport overbodig worden lijkt dit een eenvoudige en goedkope oplossing. Aandachtspunt (ook vanuit de Wvo) vormt een mogelijke milieuschade als gevolg van bestanddelen van de preparaten, gevormde afbraakproducten of een verhoogde metalenmobiliteit die het afbraakproces zou kunnen veroorzaken.

Reiniging in depot is gericht op de afbraak van gechloreerde stoffen. Deze afbraak vindt plaats gedurende de verblijfsperiode in een depot. Bewust worden anaërobe en vervolgens aërobe omstandigheden gecreëerd om achtereenvolgens een (anaërobe) dechlorering en een (aërobe) mineralisatie van dechloreringsproducten te laten plaatsvinden. Reiniging in depot is een extensief concept, waarmee op goedkope wijze het karakter van berging kan worden teruggebracht van 'eeuwig' naar 'eindig'.

Reiniging in landfarms is bedoeld voor de afbraak van olie en PAK. De daarvoor benodigde zuurstof kan de specie binnendringen als men deze op speciaal daarvoor ingerichte terreinen laat ontwateren, drogen en rijpen. Cruciaal bij dit concept is het verkrijgen en behouden van een goede structuur, waarin voldoende luchtgevulde poriën aanwezig zijn (aërobe condities). Binnen het concept reiniging in landfarms zijn meerdere uitvoeringsvormen (of technieken) ontwikkeld: intensieve landfarming en extensieve landfarming (beide in de buitenlucht) en (directe en indirecte) kasfarming (overdekte inrichting met verwarming en beluchting). De verblijftijden liggen tussen de zes maanden en circa 15 jaar, afhankelijk van de gekozen techniek en de te reinigen specie.

Reiniging in reactoren is eveneens gericht op de afbraak van olie en PAK. Hier wordt de specie gemengd met water, verwarmd, geroerd en intensief, mechanisch belucht. Reactortechnieken komen hierdoor sneller tot het gewenste resultaat dan landfarmtechnieken, maar zijn ook iets duurder. Verblijftijden liggen tussen twee en zes weken, afhankelijk van de specie. Binnen het concept worden twee uitvoeringsvormen onderscheiden: batch slurrie-systemen en continue slurrie-systemen.

In hoofdstuk 2 worden de opzet en resultaten van het onderzoek binnen de afzonderlijke concepten, per paragraaf, gepresenteerd.

2. TECHNOLOGISCHE ASPECTEN EN PRESTATIES

In dit hoofdstuk wordt informatie gegeven (principe, onderzoek, resultaten, conclusies) over vier biologische reinigingsconcepten. Dit zijn achtereenvolgens: reiniging in situ (par. 2.1), reiniging in depot (par. 2.2), reiniging in landfarm (par. 2.3) en reiniging in reactoren (par. 2.4).
In hoofdstuk 3 wordt een beschrijving en vergelijking gegeven van de toepasbaarheidsaspecten (productkwaliteit, kosten en milieu-effecten) van de verschillende concepten.
In het Basisrapport Biologisch Reinigen [1] wordt de informatie uitgebreider weergegeven.

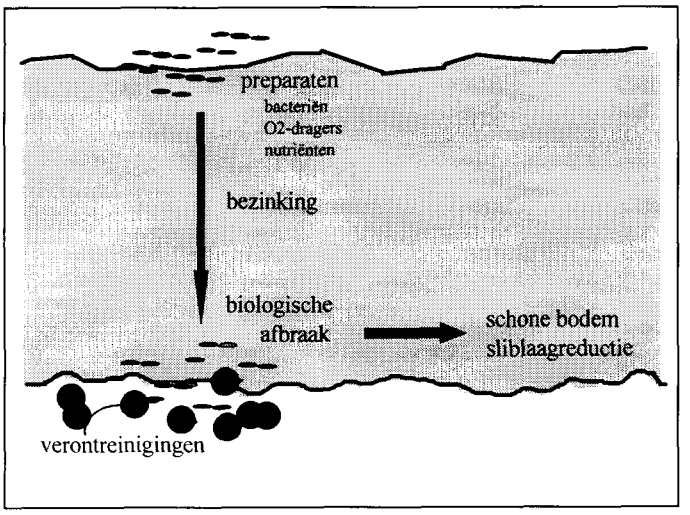
2.1 Reiniging in situ

2.1.1 Inleiding

Bij reiniging in situ wordt de waterbodem 'op locatie' behandeld zonder dat daarbij gebaggerd hoeft te worden. Dit concept, ook wel aangeduid met *biobaggeren*, is gericht op de aanpak van de verontreinigende stoffen olie en PAK en beoogt ook het volume van het sediment zelf te reduceren (afname van de sliblaagdikte). De belangrijkste procesconditie voor deze afbraakprocessen is de aanwezigheid van zuurstof. Van nature in de waterbodem optredende dechlorering van gechloreerde verbindingen (zie par. 2.2) valt niet onder dit concept .

In landbodems is het relatief eenvoudig om met water- en luchtstromen de juiste condities (nutriënten, zuurstof) voor afbraak te scheppen. Onder water, in de waterbodem, is dat moeilijk.

Figuur 6: Reiniging in situ



Omstreeks 1992 kwam echter ook voor waterbodems een aantal procédés voor biologische in situ reiniging op de Nederlandse markt.

De procédés zijn gebaseerd op het toedienen van preparaten aan de waterbodem. Deze bevatten de voor de afbraak benodigde ingrediënten: bacteriën, nutriënten en/of zuurstofdragende verbindingen.

Ze bereiken de bodem na uitstrooiing over het water, maar er zijn ook preparaten die actief door de waterbodem gemengd moeten worden.

Aangezien het oppervlaktewater de 'plaats van reiniging' vormt, gelden bij in situ reiniging regels vanuit de Wvo. Speciaal aandachtspunt vormen emissies van preparaat-bestanddelen als nutriënten. Ook kunnen als gevolg van het afbraakproces producten vrijkomen of voorheen organisch gebonden metalen mobiel worden. Deze mogelijk optredende effecten dienen in het voorstadium goed onderzocht te worden, vanwege de beperkte sturingsmogelijkheden na toediening van de preparaten.

2.1.2 Onderzoeksprojecten

Binnen POSW is besloten om vier, op dat moment (1992) op de markt gebrachte procédés nader te onderzoeken. Het onderzoek [7] moest duidelijkheid geven over de effectiviteit en de toepasbaarheid onder locatie-specifieke omstandigheden.
Het onderzoek bestond uit meerdere onderdelen:

- literatuuronderzoek naar productinformatie en eerder uitgevoerde praktijkproeven;
- analyse van de chemische en bacteriële samenstelling;
- testen van effectiviteit en effecten onder verschillende praktijkcondities;
- evaluatie, eindrapportage en Wvo-advies.

De onderzochte producten waren:

- ABR-CIS (Augmented Bio Reclamation/Conditions In situ; van Consulmij bv);
- CWR (ClearWaterRevival; van Makuport bv);

- Aquaplancton (van PMK; per 1-1-94: Hydroperfect van Symbionics s.a.r.l.);
- Udati-Biovase en Udati-Metir (van Udati Nederland bv).

Het onderzoek naar in situ reiniging werd uitgevoerd in samenwerking met diverse partijen: de productleveranciers (levering en dosering van de producten), Grontmij Advies en Techniek (veldonderzoek en chemische samenstelling), Bioclear milieubiotechnologie (laboratoriumonderzoek en bacteriële samenstelling), Haskoning Koninklijke Ingenieurs (eindrapportage en literatuuronderzoek).

De experimenten zijn uitgevoerd met specie van het Apeldoorns Kanaal en de Kameriksche Wetering. Voor het uitvoeren van *veld*experimenten bood alleen de locatie Kameriksche Wetering goede mogelijkheden.

2.1.3 Literatuurstudie

Uit de door leveranciers verstrekte productinformatie bleek dat alle producten kalk bevatten. Ook bacteriën vormen een terugkerend bestanddeel, het product Aquaplancton uitgezonderd. De producten ABR-CIS en CWR bevatten daarbij zuurstofdragende verbindingen.

Alle producten, behalve ABR-CIS, dienen op het oppervlaktewater uitgestrooid te worden. ABR-CIS-preparaten worden mechanisch met de waterbodem vermengd. In de productinformatie werden werkingsmechanismen beschreven die in principe mogelijk zijn.

De bestudeerde praktijkervaringen betroffen projecten met ABR-CIS, CWR en Udati (Met Aquaplancton waren geen praktijkresultaten voorhanden). Voor alle onderzoeken gold dat de opzet van de proefnemingen summier was, de uitgangssituatie onvoldoende goed was vastgelegd en dat de processen met een minimum aan laboratoriumonderzoek werden gevolgd. Nader onderzoek binnen POSW was derhalve zinvol.

2.1.4 Samenstelling producten

Door het uitvoeren van analyses in het laboratorium werd de chemische en de bacteriële samenstelling van de producten onderzocht. Het bleek inderdaad dat kalk een belangrijk bestanddeel (10-100%) van de producten vormde. Daarnaast kwamen hoge gehalten aan sulfaat, fosfaat, Kjehldal-stikstof en/of zink voor. Het sulfaat kan mogelijk dienen als alternatieve zuurstofbron tijdens de in situ reiniging.

Deze analyses geven, behalve inzicht in de samenstelling, ook een indruk van de mogelijke bezwaarlijkheid van de preparaten voor het oppervlaktewater. Als gevolg van diffusie- en stromingseffecten in het veld zijn de analyseresultaten niet rechtstreeks te vertalen in concentraties die in het oppervlaktewater zullen optreden. Daarom is bij veldproeven (Kameriksche Wetering) op dit aspect gelet. De eindconclusie van dit onderzoek was dat de producten weinig directe schadelijke effecten op het oppervlaktewater zouden hebben.

Bij het onderzoek naar de aanwezigheid van bacteriën bleek dat het aantal bacteriën met een potentie tot olie- en PAK-afbraak gering te zijn. De voorgeschreven dosering zou een toename van 1% betekenen in het aantal van nature voorkomende bacteriën met die potentie. Pas bij een honderdmaal sterkere dosering dan voorgeschreven werd de activiteit van toegevoegde bacteriën zichtbaar in mineralisatie-testen. De bijdrage van de toegevoegde bacteriën aan de stimulering van de in situ afbraak wordt dus als minimaal beoordeeld.

2.1.5 Laboratorium- en veldtesten

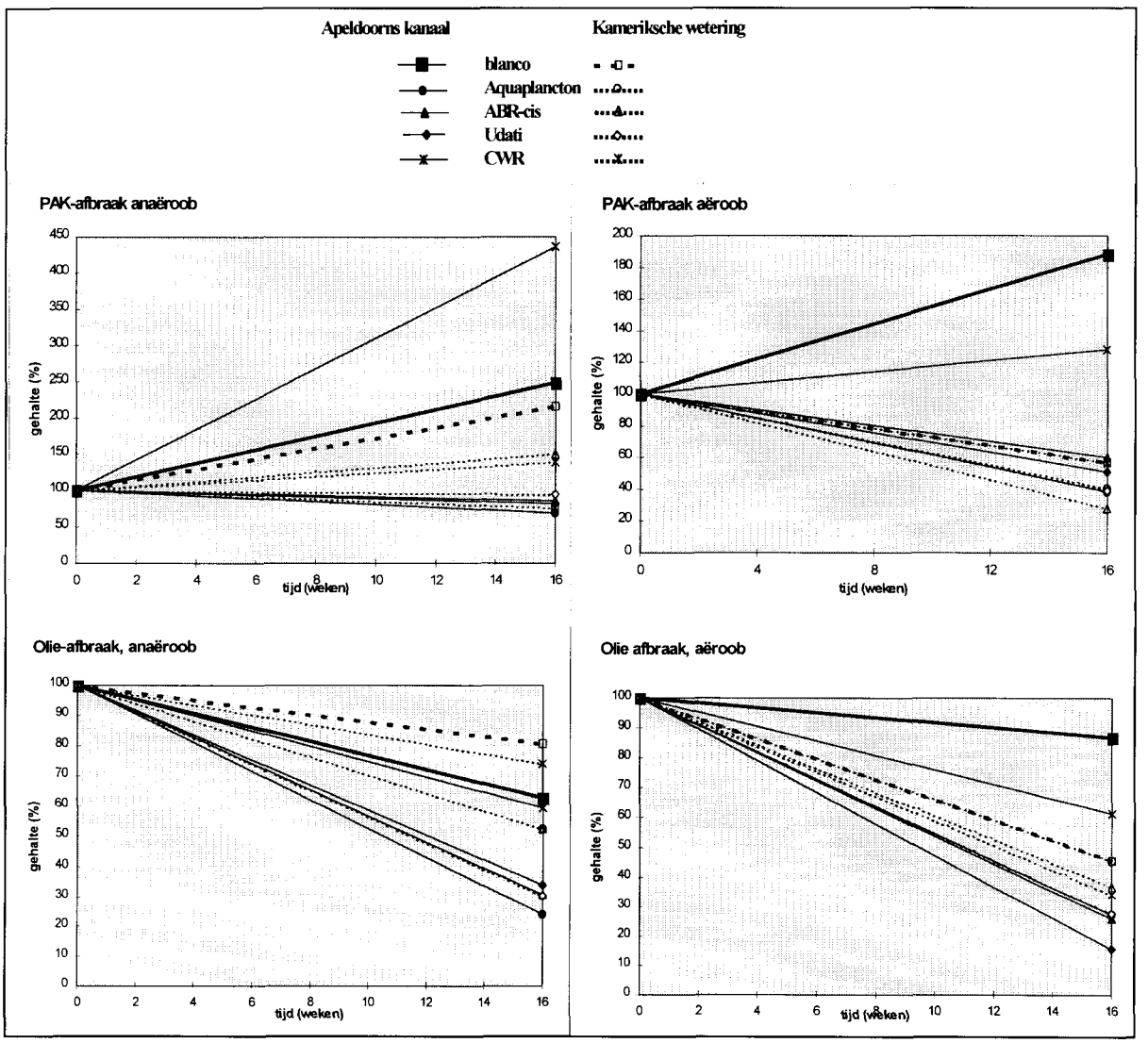
De werking van de producten is voor specie van de proeflocaties Apeldoorns Kanaal en Kameriksche Wetering onderzocht in:

1. *batch-experimenten:* in het laboratorium onder optimale condities (waaronder menging en beluchting), bedoeld om de maximaal haalbare effecten vast te stellen;
2. *kolomexperimenten:* simulatie van de veldsituatie in het laboratorium. Deze bieden een goede mogelijkheid resultaten te beoordelen, met name op het punt van sliblaagreductie;
3. *veldonderzoek:* onderzoek op proeflocaties, voor een goede relatie met de praktijk.

Batch-experimenten.
Wanneer in het laboratorium aan de specie lucht werd toegediend, trad in de meeste batches afbraak van olie en PAK op (figuur 7). Een uitzondering vormden de blanco batch en de batch met CWR met specie uit het Apeldoorns Kanaal. Hier trad duidelijk minder afbraak op. *Zonder* toevoeging van lucht werd géén afbraak van PAK, maar in veel gevallen juist een toename in de PAK-gehalten, waargenomen. De toename is vermoedelijk te verklaren uit een deeltjesverkleining tijdens het schudden. Daardoor zullen meer PAK's uit de specie vrijkomen tijdens de extractie-stap in de analyse.

Oliegehalten namen zonder toevoeging van lucht wel af. Het ging vermoedelijk slechts om een schijnbare afbraak, veroorzaakt door storing van humuszuren bij de analyse en/of het achterblijven van olie aan de glaswand van de reactoren.

Figuur 7: Resultaten van batchproeven (incubatietijd 16 weken, 20 °C)



De verklaring voor de licht verbeterde werking met ABR/CIS, Aquaplancton en Udati in aanwezigheid van zuurstof ligt in de pH-bufferende werking van deze producten. Deze gaat de bij afbraak optredende (en afbraak-remmende) 'verzuring' van de specie tegen. De verschillen vallen weg als de bufferende werking van de specie zelf al goed is. Het voordeel verdwijnt ook onder zuurstofloze condities. Onder die omstandigheden werd tevens aangetoond dat de zuurstofdragende bestanddelen van ABR-CIS en CWR in de uitgevoerde proef geen positief resultaat had.

Kolomexperimenten
Tijdens kolomexperimenten (sedimentkolom met bovenstaande waterlaag, 24 weken bij 20 °C) is aangetoond dat géén sliblaagreductie optreedt. In alle testen bleef de sliblaagdikte en het organisch stof-gehalte gelijk.
Onder deze omstandigheden trad -met of zonder preparaten- ook geen afbraak van verontreinigende stoffen op.
Verhoogde gehalten aan metalen zijn noch in het poriewater, noch in het bovenstaande water aangetroffen.

Veldproeven
De locatie voor veldproeven is zorgvuldig gekozen, waarbij rekening is gehouden met aspecten als stroming, sliblaagdikte, lozingspunten en specie-eigenschappen. Gedurende het onderzoek (met slibschermen gecreëerde proefvakken, proefduur ca. een jaar) traden veranderingen op in verontreinigingsgraad en sliblaagdikte, maar deze waren voor alle proefvakken (inclusief de blanco's) ongeveer identiek. De conclusies van het veldonderzoek waren in overeenstemming met die van het laboratoriumonderzoek: de toediening van de producten resulteerde, in vergelijking met een situatie zonder behandeling, niet in een aantoonbare, aan de werking van de producten toe te schrijven afname van PAK-gehalte, oliegehalte en sliblaagdikte.

2.1.6 Wvo-advies en vervolgonderzoeken

Naar aanleiding van de eindrapportage [7] heeft het RIZA aan de waterkwaliteitsbeheerders geadviseerd in situ reiniging Wvo-plichtig te stellen in verband met mogelijke emissies naar het oppervlaktewater [8]. Vergunning-aanvragen zou men bovendien alleen ontvankelijk moeten verklaren na een laboratoriumonderzoek (batch- en kolomproeven) waarin zowel de werking als het uitblijven van negatieve bijeffecten zijn aangetoond. Voor dit laboratoriumonderzoek is door RIZA een uitvoeringsprotocol opgesteld [8].

De resultaten van een aantal naar aanleiding van het RIZA-advies uitgevoerde protocol-laboratoriumonderzoeken en van vervolgonderzoeken van waterkwaliteitsbeheerders bevestigen de bevindingen uit POSW-onderzoek dat deze procédés vooralsnog niet doelmatig zijn. In het Basisrapport Biologisch Reinigen [1] wordt nader op deze onderzoeken ingegaan.

2.1.7 Conclusies en aanbevelingen

- Geen van de vier door POSW onderzochte producten was, na toediening op de voorgeschreven wijze, in staat de zuurstofloosheid van de waterbodem - *de beperkende factor in dit geval* - op te heffen. Geen van de producten heeft dan ook geleid tot een aantoonbare verbetering van de afbraak in situ. Dat geldt niet alleen voor de verontreinigende stoffen maar ook voor het materiaal zelf: een aantoonbare sliblaagreductie als gevolg van in situ behandeling is niet gevonden.
- Tijdens het vervolgonderzoek werd één procédé getest, waarbij mechanisch lucht in de waterbodem moet worden gebracht. Dit bleek op de onderzochte locatie te weinig beluchting te geven om tot een aantoonbare kwaliteitsverbetering van het sediment te komen [1].
- De door POSW onderzochte producten (m.u.v. CWR) hadden een pH-bufferende werking. Als aan de eerste randvoorwaarde - de aanwezigheid van voldoende zuurstof - is voldaan, kan deze buffering de biologische

afbraak versnellen.

- Aantallen en activiteit van olie- en PAK-afbrekende bacteriën in de producten waren dusdanig laag dat deze geen stimulans voor de in situ reiniging inhouden.
- Er zijn in het POSW-onderzoek geen nadelige effecten van de producten op het oppervlaktewater waargenomen. Er is echter ook geen biologische activiteit opgetreden, die zou kunnen leiden tot mobilisatie van metalen en het vrijkomen van afbraakproducten.
- Het waterbodemsysteem heeft een dynamisch karakter. Metingen in het veld zijn sterk onderhevig aan variaties ten gevolge van slibtransport en de inhomogene verdeling van verontreinigende stoffen in het slib. Ook externe bronnen (lozingen/oppervlakkige afstroming/inspoeling) beïnvloeden het beeld. Een goede beoordeling vraagt een gedegen analyse van de aanwezige locatie specifieke omstandigehden en een intensieve monitoring van het proces.
- De effectiviteit van biologische in situ reiniging wordt op basis van de in dit project verkregen resultaten als gering ingeschat.
- Analoog aan het RIZA-advies wordt aanbevolen om bij een afweging op toepassing van dergelijke procédés, in een voorfase, in het laboratorium de werking en mogelijke (neven)effecten vast te stellen.

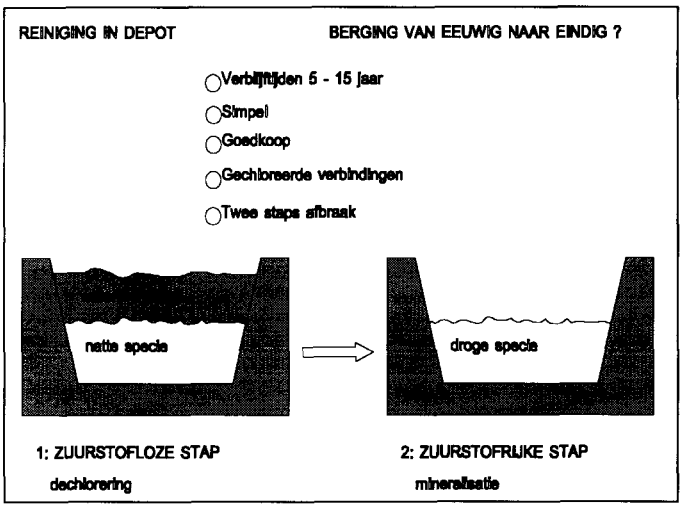
2.2 Reiniging in depot

2.2.1 Inleiding

Reiniging in depot is (in dit rapport) specifiek bedoeld voor de aanpak van baggerspecie die verontreinigd is met gechloreerde organische stoffen, zoals hexachloorbenzeen (HCB) en PCB. Eind tachtiger jaren bleek in laboratorium- en veldstudies dat deze voorheen als 'persistent' bestempelde stoffen onder bepaalde condities toch afbreekbaar zijn.

Het idee van reiniging in depot is ontstaan uit de twee-staps afbraak waarmee in principe gechloreerde verbindingen tot onschadelijke stoffen gemineraliseerd kunnen worden en de mogelijkheden in een depot om de daarvoor benodigde condities te realiseren.

Figuur 8: reiniging in depot



Bij de eerste stap mag - in tegenstelling tot de eisen bij afbraak van olie en PAK - *geen* zuurstof aanwezig zijn. Onder anaërobe omstandigheden verwijderen bacteriën chlooratomen uit de moleculen.

Daardoor ontstaan steeds lager gechloreerde tussenproducten en uiteindelijk producten die door andere bacteriën, in de tweede stap, kunnen worden afgebroken.

Die tweede afbraakstap kan pas beginnen bij *aanwezigheid* van zuurstof.

Een dergelijke twee staps benadering kan worden gecreëerd door eerst tot berging in een depot *onder water* over te gaan en pas in in tweede instantie het depot te *ontwateren*. De tweede stap is vergelijkbaar met landfarmtechnieken (zie par. 2.3). De na de eerste fase verkregen dechloreringsproducten van HCB kunnen (m.u.v. 1,3,5-trichloorbenzeen) aëroob worden afgebroken tot water, koolzuur en chloride.

In de meeste gevallen blijkt de dechlorering uitgevoerd te kunnen worden door van nature in de bodem voorkomende micro-organismen. Door het anaërobe karakter van de waterbodem, kan de eerste stap, de dechlorering, zelfs ook in situ optreden.
Tegenover de lange halfwaardetijden in het veld (bijvoorbeeld zeven jaar voor HCB in het Ketelmeer [9]) staan tijden van enkele weken in het laboratorium onder optimale condities (goede menging, geschikte temperatuur en gemakkelijk afbreekbare substraten als toeslagstoffen). Aan die condities wordt in depot niet voldaan zonder menging en verwarming. Voorzover niet op dergelijke maatregelen wordt teruggevallen, is reiniging in depot een extensieve maar daarmee eenvoudige en goedkope methode. De voornaamste processturing betreft de zuurstofconcentratie (anaëroob/aëroob). Men kan daarbij eventueel nog gebruik maken van toeslagstoffen (substraten en entmateriaal).

Als nergens in het proces (anaërobe plus aërobe stap) gebruik wordt gemaakt van toeslagstoffen, menging of verwarming spreekt men van 'intrinsieke biorestauratie' (intrinsiek = bodem-eigen/natuurlijk). Men volgt dan de

natuurlijke processen door monitoring.

Door de extensieve stimulatie van de afbraak bij reiniging in depot blijven de benodigde verblijftijden relatief lang: tussen de 5 en 15 jaar, afhankelijk van het type specie. Ten opzichte van het alternatief -'eeuwige' opslag in depot- komt dit neer op een aanzienlijke vooruitgang. Als reinigingsmethode is deze werkwijze langzaam, maar ook goedkoop en eenvoudig te realiseren.

2.2.2 Onderzoeksprojecten

Het onderzoek naar dechlorering [10] omvatte praktijkonderzoek in depot met slib uit de Zeehaven te Delfzijl (Bioclear Milieubiotechnologie in samenwerking met RWS Noord Nederland en RWS Bouwdienst). Aanvankelijk richtte het onderzoek zich op extensief gestimuleerde reiniging (onder toevoeging van diverse toeslagstoffen). Daarna werden processen enkel via monitoring gevolgd (intrinsieke biorestauratie).
Aanvullend onderzoek is verricht naar onder meer:

- dechlorering in het laboratorium (LUW, Microbiologie) ter bepaling van de afbraakpotentie onder optimale omstandigheden;
- onderzoek naar de desorptiekinetiek van HCB (RIZA, WSC) om inzicht te krijgen in hoeverre de binding van HCB aan de betreffende specie de dechlorering kan beïnvloeden;
- aërobe mineralisatie (Bioclear): beluchte biodegradatie(laboratorium)proeven om de afbraakpotentie bij de tweede afbraakfase te onderzoeken.
- toxiciteit en uitloging (Aquasense en Iwaco), voor inzicht in de daadwerkelijke risico's van de specie.

2.2.3 Praktijkproef

Extensieve reiniging
Bij sanering van het Zeehavenkanaal te Delfzijl is 6000 m^3 van het sterkst verontreinigde materiaal (tot 200 ppm HCB) in een klein, voor de proef ingericht depot gebracht. Doel van het project was inzicht te krijgen in de haalbaarheid van het reinigingsconcept onder praktijkcondities. Het ging om een *extensieve* behandeling, waarbij de biologische activiteit op extensieve wijze gestimuleerd werd. Het effect van (combinaties van) verschillende toeslagstoffen (substraat, nutriënten, entmateriaal) op de dechlorering werd onderzocht. Tien verticaal aangebrachte (aan de onderzijde) open buizen die aan een drijvend ponton bevestigd waren, fungeerden als 'enclosures', waarbinnen de effecten gevolgd werden.

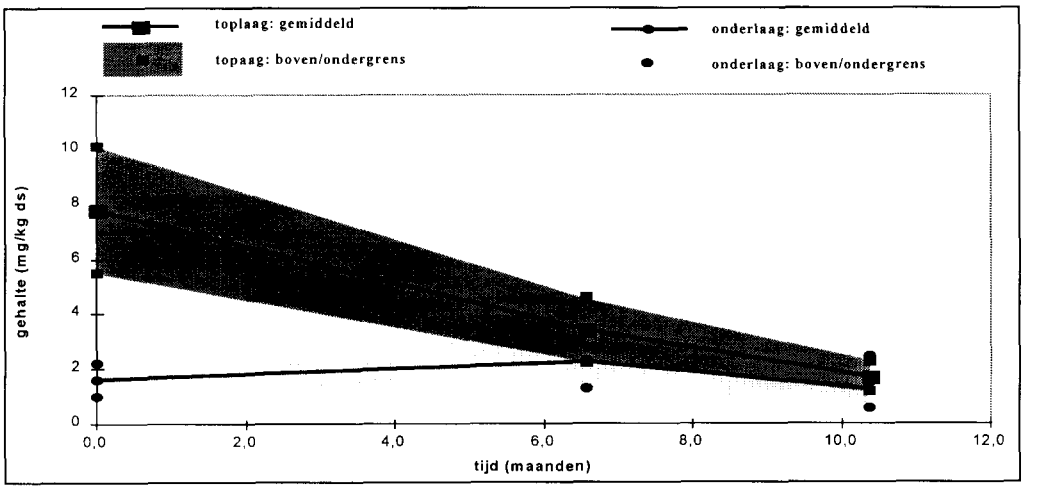
Na 2 maanden door overvloedige regenval, het ponton hoger komen te liggen, waardoor de buizen niet meer in de sliblaag zaten. De proef zou opnieuw ingezet moeten worden. Dit werd niet gedaan, omdat de gehalten aan HCB circa 10 maal lager waren dan verwacht. Er is overgestapt naar het volgen van de *intrinsieke* reiniging (zie onderstaand). Overigens is in de twee maanden geen verandering in het HCB-gehalte geconstateerd, wat niet verwonderlijk is, gezien de korte periode en de verwachte processnelheid (totale verblijftijden van meer dan tien jaar) is dit niet verwonderlijk.

Intrinsieke reiniging
Vervolgens is de intrinsieke reiniging (zonder stimulering) gevolgd met een aangepaste monitoring (diverse locaties in het depot, looptijd 11 maanden). Daarbij werd, ondanks een grote spreiding in analyseresultaten een duidelijke afname van HCB-gehalten gevonden (figuur 9).

De halfwaardetijden waren korter naarmate beginconcentraties op een locatie hoger waren (bijvoorbeeld: 4 maanden bij 14 ppm tegen 14 maanden bij 1 ppm). Vermoedelijk hangt dit samen met een relatief grotere biobeschikbare fractie bij hogere concentraties.

Uit de resultaten kan worden afgeleid dat de verblijftijd die benodigd is voor dechlorering tussen de 3 en 5 jaar zou kunnen te liggen. Het is echter mogelijk dat de dechloreringsnelheid steeds trager zal worden, naarmate het HCB-gehalte lager wordt. Opvallend is, dat de HCB-afname niet gepaard gegaan met een toename van lager gechloreerde benzenen, de producten van dechlorering. De massabalans klopt derhalve niet. Verder onderzoek op dit punt is nodig, ook om een betere inschatting van de benodigde verblijftijden te kunnen maken.
Parallel aan het praktijkonderzoek is ook aanvullend onderzoek verricht (paragraaf. 2.2.4)

Figuur 9: HCB-gehalten in depot



2.2.4 Aanvullend onderzoek

Dechlorering in laboratorium.
In het laboratorium werd onder optimale condities de dechlorering met verschillende toevoegingen getest. Extra toegevoegd HCB bleek snel gedechloreerd te worden: HCB verdween en de dechloreringsproducten kwamen daarvoor in de plaats. Dechlorering van de *reeds aanwezige* verontreiniging was niet zichtbaar in een analytisch ruis, vermoedelijk omdat gewerkt is met te kleine batches (grotere kans op heterogene verdeling van HCB over batches) en mogelijk ook met een te korte experimentduur.

Desorptie in het laboratorium.
Het beschikbaar komen van HCB uit het sediment (desorptie) werd in het laboratorium bepaald onder optimale condities (menging, temperatuur). In de meeste gevallen zal eerst een hoge desorptie-snelheid gevonden worden (zwak of niet gebonden verontreinigende stoffen) en daarna een lagere snelheid (sterk gebonden verontreinigende stoffen). Dit patroon is terug te vinden in het verloop van biologische reinigingsprocessen: een snelle afbraak, gevolgd door een veel tragere.
Hoewel een groot deel van het HCB in de specie uit de Zeehaven tot de traag desorberende fractie behoorde (een vermoedelijk gevolg van 'aging'), was de absolute desorptie-snelheid in deze fractie relatief hoog. Geëxtrapoleerd naar de condities in het depot luidt de conclusie dat het niet waarschijnlijk is dat de biologische dechlorering daar beperkt wordt door de binding van HCB aan het sediment.

Mineralisatie in het laboratorium.
Er is behalve naar dechlorering ook onderzoek verricht naar aërobe mineralisatie zoals die in de tweede fase van reiniging in depot kan plaatsvinden. In biodegradatieproeven in het laboratorium werd in aanwezigheid van lucht gekeken of dechloreringsproducten omgezet kunnen worden tot water en koolzuur.
Het bleek dat deze stap voor het Delfzijlse sediment zonder toevoeging van entmateriaal goed uitvoerbaar is. In

het sediment komen (naast dechlorerings-bacteriën) bacteriën voor, die de mineralisatie kunnen uitvoeren mits zuurstof aanwezig is. De concentratie van het dechloreringsproduct monochloorbenzeen bijvoorbeeld, werd binnen 30 dagen teruggebracht van 2,5 naar 0 ppm (halfwaardetijd ca. 2 weken).
Bij extrapolatie van de resultaten naar de minder gunstige condities in het (ontwaterde) depot is onder meer gebruik gemaakt van kennis uit landfarming. Deze landfarming vindt plaats onder vergelijkbare procescondities. Deze afbraakfase zal, mede afhankelijk van de kwaliteit van het uitgangsmateriaal, twee tot vier jaar duren voordat volledige mineralisatie van de dechloreringsproducten heeft plaatsgevonden.

Eco-toxiciteit en uitloging.
Twee maal is tijdens het aanvullend onderzoek, de toxiciteit (bio-assays) en de uitloging van HCB en kwik (schudtesten) bepaald. Deze testen geven inzicht in de daadwerkelijke milieurisico's van de specie.
In tabel 1 worden de resultaten van de bio-assays en uitloogtoetsen gepresenteerd.

Tabel 1: Resultaten van bio-assays en uitloogtesten

	bio-assays		*uitloging HCB*	
juli 1994	oesterlarve:	matig toxisch	0,0033 - 0,009	mg/kg ds
	slijkgarnaal:	niet toxisch		
	microtox:	niet toxisch		
november 1995	oesterlarve:	(niet getest)	0,0018 - 0,0032	mg/kg ds
	slijkgarnaal:	niet toxisch		
	microtox:	niet toxisch		

In de uitgangssituatie was het sediment alleen voor het meest gevoelige testorganisme, de oesterlarve, (matig) toxisch. In 1995 is de oesterlarvetest niet gelukt. Ook toen was de specie niet toxisch voor de andere testorganismen. De uitloging van HCB veranderde niet wezenlijk. Wel valt op dat maar een klein deel van de aanwezige HCB uitloogbaar is: slechts 0,01%.

2.2.5 Conclusies en aanbevelingen

- Uit desorptieproeven met het Delfzijlse sediment werd aannemelijk dat de dechlorering in deze specie niet zal worden beperkt door de biobeschikbaarheid van het HCB.
- In overeenstemming met de resultaten van het desorptie-onderzoek, is in het depot gedurende een periode van bijna een jaar, een significante afname van het HCB-gehalte van de Delfzijlse specie waargenomen. Dit gebeurde zonder toeslagstoffen (intrinsieke biorestauratie). Hierbij bleek de afname sneller te verlopen naarmate de beginconcentratie hoger was (een situatie waarin naar verwachting, de biobeschikbare, snel desorberende fractie groter is). Een bewijs voor een feitelijke *dechlorering*, in de vorm van een verhoogde concentratie tussenproducten, ontbrak echter. Een mogelijke verklaring (momenteel in onderzoek) is een anaërobe afbraak van lager gechloreerde benzenen, of tijdelijke aërobe periodes in de bovenlaag, waardoor de producten aëroob gedechloreerd worden.
- Laboratoriumproeven onder optimale condities lieten zien dat in de Delfzijlse specie (Zeehavenkanaal) van nature bacteriën aanwezig zijn die HCB anaëroob kunnen dechloreren en bacteriën die de daarbij ontstane producten in aanwezigheid van lucht kunnen mineraliseren. De potentie voor intrinsieke reiniging is in deze specie aanwezig. Het is een veelvuldig optredend fenomeen dat specie van nature reeds de voor afbraak geschikte bacteriën aanwezig zijn, ook waar het andere stoffen dan HCB betreft.
- Ten aanzien van de toekomst van reiniging in depot kan worden gesteld dat er perspectieven liggen. Per specie kunnen (in het laboratorium uitgevoerde) desorptie- en biodegradatieproeven inzicht geven in het haalbare resultaat en de benodigde verblijftijd.

- De kosten voor de verwerking zullen gelijk zijn met die van storten in depot, opgehoogd met kosten voor monitoring (driemaal per zomer). Regelgeving vanuit de Wvo vraagt aandacht in verband met het te lozen water.
- De benodigde verblijftijden zullen per specie variëren. Voor het gehele intrinsieke reinigingsproces zal een verblijf van ordegrootte 5 tot 15 jaar nodig zijn. Voor een verwerkingstechniek lijkt dit een lange termijn. Er is echter geen strijdigheid met het zich op dit moment ontwikkelende beleid. Ten opzichte van het 'eeuwig' bergen in depot wordt hiermee een fors voordeel behaald. Verdere optimalisatie (menging, substraattoediening) van de techniek leidt mogelijk tot kortere verblijftijden.
- Ervaring met meer verschillende species is wenselijk. De resultaten hebben nu betrekking op één type specie.

2.3 Reiniging in landfarms

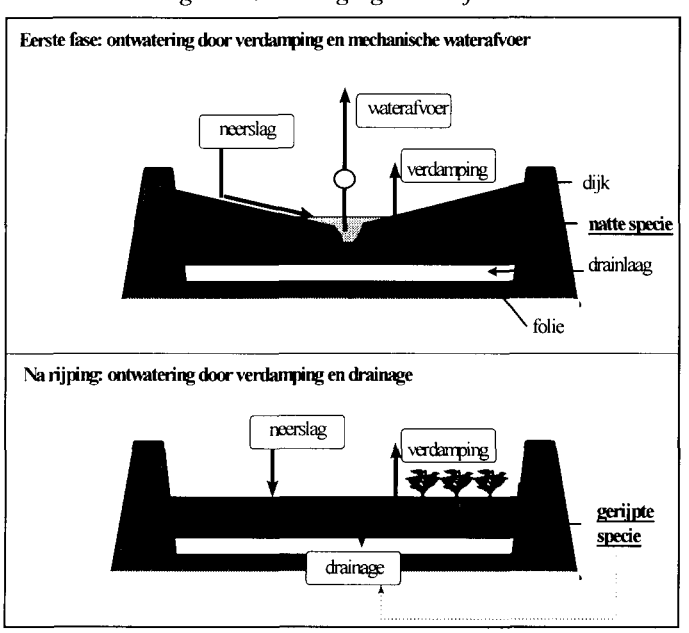
2.3.1 Inleiding

Reiniging in landfarms is een (ex situ-) techniek voor het behandelen van baggerspecie die is verontreinigd met olie en PAK. Door de specie in een dunne laag op het land te brengen (op speciaal daartoe ingerichte percelen) kan de specie ontwateren en drogen. Daarbij treedt -afhankelijk van de structuur- in zekere mate lucht (zuurstof) de specie binnen en kan de biologische afbraak van olie en PAK van start gaan.

In het landfarmproces zijn drie (deels overlappende) fasen te onderscheiden: een rijpingsfase (ontwatering en structuurverbetering), een fase van snelle biologische afbraak en een veel langzamer verlopende afbraakfase.
Bij rijping moet de natte (zuurstofloze) specie ontwateren en een losse structuur krijgen. Bewerking van de sliblaag (begreppelen, eggen, harken, ploegen) bevordert de ontwatering. De structuurvorming is het resultaat van een samenspel van fysische, chemische en biologische processen. Naarmate de structuur verbetert, waarbij luchtgevulde poriën gaan ontstaan, zal de snelle fase van de biologische afbraak op gang komen. Aanvankelijk worden de direct beschikbare verontreinigende stoffen afgebroken waardoor de afbraak snel verloopt. Ondertussen dient de structuur verder verbeterd te worden door bewerking ofwel beplanting van de specie.

Nadat alle goed beschikbare verontreinigende stoffen zijn afgebroken, gaat de desorptie-snelheid (beschikbaar komen van sterk aan de specie gebonden stoffen) het tempo van de afbraak bepalen. Er start een fase van langzame afbraak, waarin maatregelen die het proces in de eerste fase versnellen weinig effect hebben.

Figuur 10: Reiniging in landfarms



Figuur 10 toont een doorsnede van buitenterreinen voor landfarming: de terreinen zijn omdijkt om de aanvankelijk slappe specie bijeen te houden en hebben drainagevoorzieningen, een verzamelsloot en in het algemeen een onderafdichting. Eisen ten aanzien van inrichting en te lozen water komen voort uit (respectievelijk) de Wm en de Wvo.

Het idee achter reiniging in landfarms is dat het een technisch eenvoudige en arbeidsextensieve (en dus goedkope) oplossing biedt voor met PAK en olie verontreinigde baggerspecie.
Landfarming zal overigens niet toepasbaar zijn op alle specietypen: zeer fijn materiaal slaat in de structuurvormende fase juist dicht zodat zuurstof indringing uitblijft.

Binnen het concept van reiniging in landfarms worden *drie varianten* onderscheiden:

1. *Intensieve landfarming* heeft betrekking op de behandeling in de rijpingsfase en de daarop ingrijpende snelle afbraakfase, de periode waarin meestal intensieve bewerking (ploegen e.d.) aan de orde is. Soms worden nutriënten of kalk toegevoegd. De verblijftijden liggen in de ordegrootte van één tot drie jaar, afhankelijk van de specie en de intensiteit van bewerking.
2. *Extensieve landfarming* betreft de langzame afbraak die op de fase van snelle afbraak volgt. Er is wel een

goede bodemstructuur vereist, maar intensieve bewerking is niet zinvol omdat deze de afbraak in deze fase niet zal versnellen. Extensieve landfarming kan 5 tot 40 jaar duren, afhankelijk van de speciesoort en - samenstelling en het gewenste resultaat.

3. *Kasfarming* is gericht op het versnellen van (de ontwatering en) de afbraak in de eerste fase door beluchting en verwarming in overkapte inrichtingen. Kasfarming wordt met succes toegepast op zandige, met olie verontreinigde *land*bodems. Voor toepassing op baggerspecie onderscheidt men *directe kasfarming* (direct na het baggeren) en *indirecte kasfarming* (kasfarming na ontwatering in de open lucht).

2.3.2 Onderzoeksprojecten

Vanaf 1989 is onderzoek verricht naar de mogelijkheden om baggerspecie middels landfarming te reinigen. Daarbij is aandacht besteed aan aspecten die van belang zijn voor de optimalisatie van landfarmprocessen als: structuur en ontwatering (verkorten ontwateringsfase en in stand houden bereikte structuur); laagdiktes (onderzoek naar maximale laagdiktes teneinde ruimte en geld te besparen); drainage en onderafdichting (onder meer alternatief materiaal voor de onderafdichting van percelen) en de seizoensinvloed (optimale startmoment voor met name intensieve landfarming).

Gestart is met een onderzoek naar intensieve landfarming op laboratoriumschaal [11], waarin is gekeken naar de effecten van toeslagstoffen als entmateriaal, compost en houtsnippers. Tegelijkertijd werd een vier jaar durende praktijkproef gestart met specie uit op dat moment lopende saneringen: de Geulhaven (Rotterdam) en de Oude Haven 't Sas (Zierikzee).
In het tweede deel van het POSW-programma (POSW-II) zijn de species uit Geulhaven en Zierikzee, na vier jaar intensieve landfarming, verder behandeld met extensieve landfarming [12]. Ook is Intensieve landfarming verder geoptimaliseerd in onderzoek met twee, op karakteristiek en verontreinigingsgraad geselecteerde species: specie uit de haven van Wemeldinge (van een veel voorkomend verontreinigingsniveau) en specie uit de Amsterdamse Petroleumhaven (extreem verontreinigde specie) [13]. Daarbij is ook een proef genomen met een onderafdichting van compost in plaats van folie met drainagelaag. Ook is door middel van proeven in containers onderzocht of bronnering de ontwatering zou kunnen versnellen. In deze fase van het programma is tevens gekeken naar directe kasfarming met Petroleumhavenspecie [14] en naar indirecte kasfarming met species die een jaar intensief behandeld waren (Petroleumhaven- en Wemeldingespecie) [13].

Figuur 10: Vullen van landfarmterrein met Petroleumhavenspecie en spontane begroeiing na 3 jaar

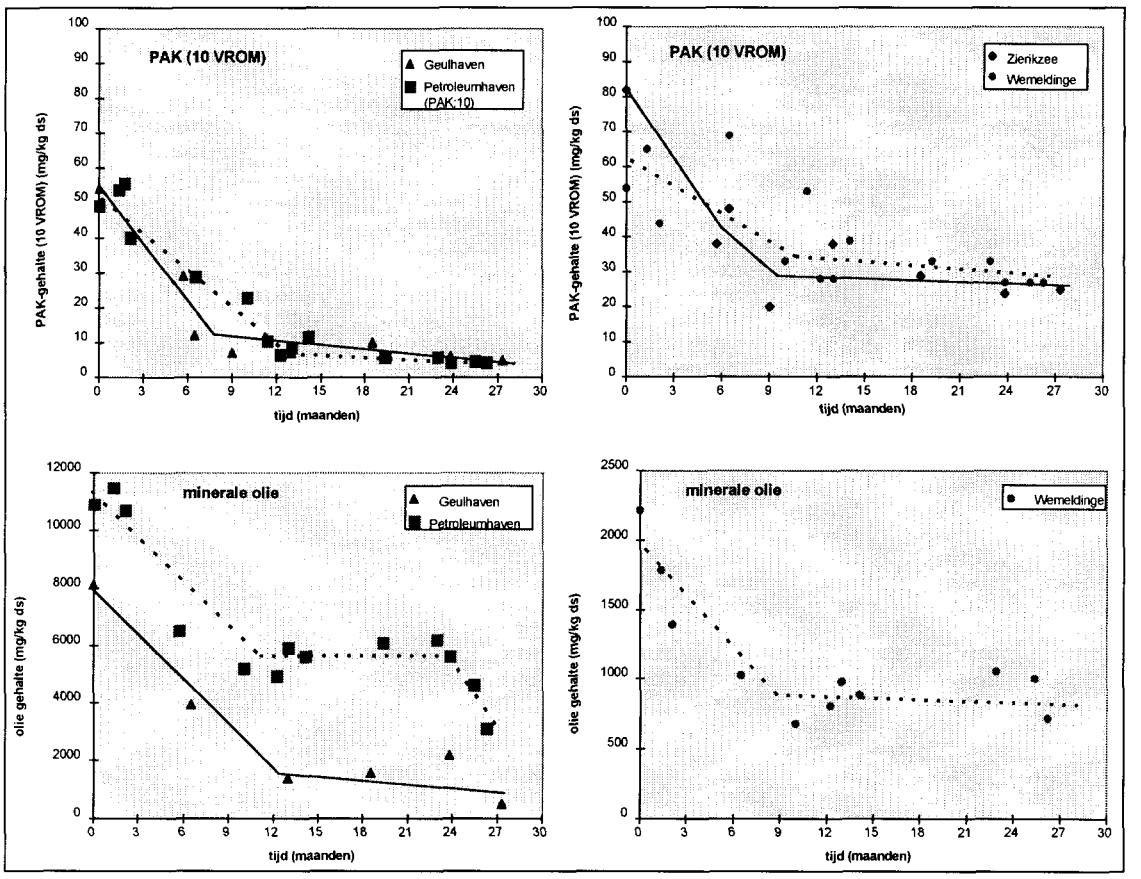
2.3.3 Intensieve landfarming

Afbraak van olie en PAK.

Figuur 11 geeft een beeld van het verloop in de chemische samenstelling van de specie tijdens de proeven met intensieve landfarming.

Met uitzondering van de proef met Wemeldingespecie, lieten alle experimenten een duidelijke eerste snelle afbraak zien, gevolgd door een tweede trager verloop. Tevens viel op dat ook species met vergelijkbare beginconcentraties PAK verschillende afbraakpatronen hadden. Verschillen in de verschijningsvorm en biobeschikbaarheid van de verontreinigende stoffen in de species kunnen dit verklaren (zie ook hoofdstuk 1). Opvallend is dat de olie-afbraak in Petroleumhavenspecie na een eerste snelle afbraakfase bijna een jaar geheel stillag, waarna in de derde zomer de afbraak snel verder ging. Een verklaring hiervoor is niet gevonden.

Figuur 11: Afname in de tijd van PAK en oliegehalten in intensieve landfarms.



Toetsing productkwaliteit.

Ook al is bij intensieve reiniging in alle species een goede afbraak opgetreden, een reiniging is alleen succesvol te noemen wanneer de *productkwaliteit* na reiniging hergebruik (getoetst aan streefwaarden ENW [5]) of toepassing als bouwstof (toetsen aan Bouwstoffenbesluit, Bsb [15]) mogelijk maakt.

De resultaten van de toetsing (hieronder uitgebreider behandeld) waren uitgesproken gunstig voor wat betreft PAK. Na reiniging lagen de PAK-concentraties onder de Bsb-grenswaarde voor die stoffen. De concentraties minerale olie lagen na reiniging in de landfarms echter boven de Bsb-grenswaarde voor olie.

De streefwaarden voor minerale olie en PAK (10 VROM) liggen op 50 respectievelijk 1 mg/kgds. Dergelijke niveaus zijn in de praktijk nauwelijks haalbaar en alleen met extensieve landfarming kosten-effectief. Daarom

vormden voor het onderzoek, de grenswaarden van 500 resp. 40 mg/kg ds voor olie en PAK uit het Bouwstoffenbesluit (Bsb), de toets die de producten zouden moeten kunnen doorstaan. Als ze aan deze Bsb-grenswaarden voldoen, kunnen ze worden toegepast in werken.

De eindconcentraties PAK in alle onderzochte species voldeden aan de Bsb-grenswaarde (40 mg/kg ds), deze werd bereikt in 6 tot 26 maanden. In de species waarin olie aanwezig was, werd de grenswaarde voor minerale olie (500 mg/kg ds, bij 10 % organische stof) niet gehaald. Beter waren de resultaten van een grootschalige sanering te Wemeldinge (RWS directie Zeeland) waarbij de specie binnen twee jaar was omgezet in een volgens het Bouwstoffenbesluit toepasbaar materiaal.

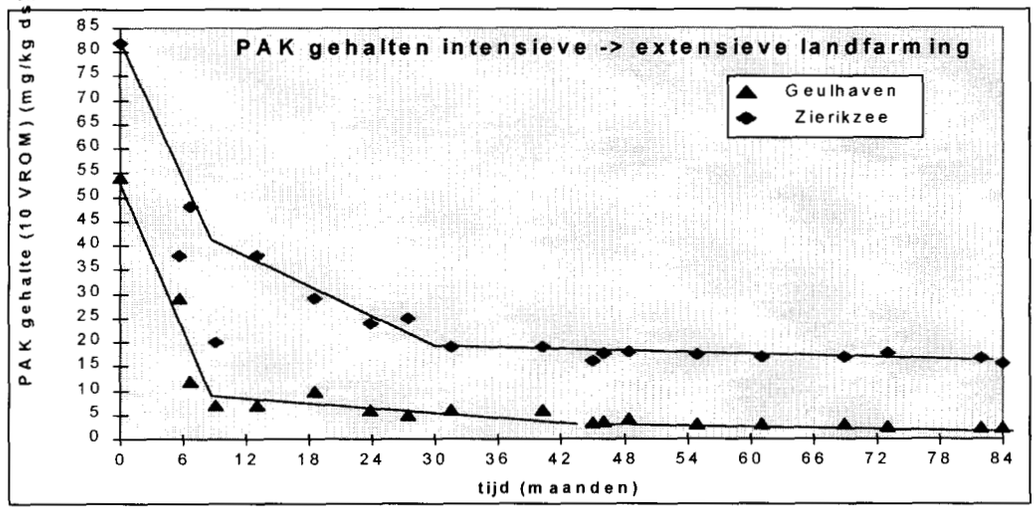
Uitloging en ecotoxiciteit.
De uitloging van PAK is in twee specietypen gemeten. De absolute uitloging was in beide gevallen in een jaar met circa 50% verminderd. Tijdens de landfarmexperimenten zijn geen verontreinigende stoffen in het drainagewater aangetroffen. Bio-assays zijn met vier species uitgevoerd. In vier jaar tijd nam de toxiciteit van twee van de vier species sterk af. De productkwaliteit komt in paragraaf 3.1 uitgebreider aan de orde.

Uitvoeringsaspecten.
De proeven resulteerden ook in veel praktische ideeën en inzichten ten aanzien van de uitvoering. Te noemen zijn onder meer de aanleg van hellende percelen (regenwaterafvoer) en het gebruik van compost of turf als onderlaag. Compost of turf bleek ten opzichte van de veelal voorgeschreven (Wm) onderafdichting met HDPE-folie een even veilige, goedkopere en zelfs drainage verbeterende bescherming te zijn. De experimenten leverden inzicht in de vele fysische ontwikkelingen tijdens het rijpingsproces.
Ook de rol die beplanting en actieve bronnering in dit opzicht kunnen spelen is onderzocht. Inplanten en inzaaien bleek bemoeilijkt te worden door het zoutgehalte, droogte en vraat. Daarom kon slechts het effect van de spontaan opgekomen vegetatie bestudeerd worden. In de bovenlaag zorgden wortels voor een met bewerking vergelijkbaar effect. De onderlaag bleef echter in structuurvorming en daarmee in afbraak achter, maar de situatie zal verbeteren als met de tijd de beworteling dieper wordt. Proeven met mechanische ontwatering (uitgevoerd in containers) leidden tot de conclusie dat men de ontwatering zo weliswaar zou kunnen versnellen, maar niet op een kosten-effectieve manier.

2.3.4 Extensieve landfarming

De species uit de Geulhaven en Zierikzee, die gedurende bijna vier jaar middels intensieve landfarming [11] waren 'voorgereinigd' (zie hierboven) werden in 50 centimeter-dikke lagen op aparte velden gebracht en vervolgens gedurende drie jaar gemonitored [12]. Daarbij zijn op uitgebreide schaal chemische, fysische en ecotoxicologische parameters gemeten.
Ook gedurende de extensieve landfarm bleek nog verbetering van de structuur plaats te vinden, resulterend in een geheel aëroob bodemprofiel, zelfs in de (natte) winterperiode. De spontane begroeiing bevorderde de structuurontwikkeling op beide velden. In testen met regenwormen werden geen nadelige ecotoxicologische effecten gevonden. Er trad verdere afbraak van PAK op. In figuur 12 is het verloop van de PAK-afbraak grafisch weergegeven.

Figuur 12: PAK-gehalten in intensieve en extensieve landfarm.



De belangrijkste conclusie van deze waarnemingen is dat de (na intensieve reiniging) resterende verontreinigende stoffen inderdaad nog verder afgebroken kunnen worden. De hypothese dat de afbraak ná de eerste afbraakfase sterk beperkt wordt door desorptie van de af te breken stoffen, is bevestigd.
Tevens valt uit de figuur op te maken dat de afbraak mogelijk niet in twee, maar in drie fasen verloopt. De snelheid in de derde fase ligt weer lager dan in de tweede fase.

Tot extensieve landfarming kan worden overgegaan nadat bij een intensieve landfarming is gebleken dat de afbraak in de tweede fase is gekomen. Dit kan al aan de orde zijn bij hogere concentraties dan in de hier geteste Geulhaven- en Zierikzeespecie het geval was. De nagestreefde productkwaliteit kan ofwel die voor toepassing als bouwstof volgens het Bouwstoffenbesluit zijn, ofwel die voor hergebruik (streefwaardekwaliteit). Voor dit laatste, de multifunctionele toepassing, is het van belang dat de textuur van de specie intact blijft, een eis waaraan met landfarming voldaan zal kunnen worden.

Als de bij extensieve landfarming gevonden afbraaksnelheden worden doorgetrokken volgen daaruit verblijftijden van 4 tot 18 jaar om van het product uit intensieve reiniging te komen tot PAK-concentraties op de streefwaardeniveau. Rekening houdend met gaandeweg nog verder afnemende afbraaksnelheden worden verblijftijden van 5 tot 40 jaar niet uitgesloten. Een dergelijk langdurig ruimtebeslag valt gemakkelijker te rechtvaardigen als extensieve reiniging gecombineerd wordt met aangepast nuttig gebruik van de locatie. Interessant in dit verband is het idee van DLO Staring Centrum om extensieve landfarming te koppelen aan bodemgebruik met wilgenteelt (energieteelt) of natuurontwikkeling. Daarmee wordt dan ook beplanting als gunstige procesfactor gerealiseerd. Extensieve landfarming kan ook plaatsvinden tijdens toepassing (volgens

Bouwstoffenbesluit) in werken als ophooglagen van (toekomstige) grootschalige bedrijfsterreinen, geluidswallen of afdeklagen.

2.3.5 Kasfarming

De landfarmvariant 'kasfarming' is in het verleden ontwikkeld voor landbodems. Voor baggerspecie was het effect van verwarming en beluchting op de ontwatering onbekend. Daarom is binnen POSW kasfarming onderzocht met baggerspecie direct na het baggeren (directe kasfarming) en met baggerspecie die gedurende een periode (12 maanden) een intensieve landfarming had ondergaan (indirecte kasfarming).

Een proef met directe kasfarming is uitgevoerd met Petroleumhavenspecie in een deel van een bestaande landfarmingsinstallatie. Voor oliehoudende landbodems ligt de verblijftijd in dit systeem tussen de één en drie weken. Indirecte kasfarm werd getest met Wemeldinge- en Petroleumhavenspecie, die een jaar in een intensieve landfarm was gerijpt.

De conclusie die uit de resultaten getrokken wordt, is dat directe kasfarming, tenminste voor Petroleumhavenspecie, niet kosten-effectief is [14]. De beluchting en verwarming hadden namelijk weinig tot geen effect op de ontwatering. Ten aanzien van *in*directe kasfarming luidt de conclusie dat deze techniek kan leiden tot een sterk versnelde afbraak [13]. In de gerijpte specie was verwarmen en beluchten van de specie wel effectief. Indirecte kasfarming kan worden ingezet wanneer in de nazomer blijkt dat in een intensieve landfarming de afbraak bijna het gewenste niveau heeft bereikt. Door het overbrengen van het materiaal naar een kas voor kasfarming, kan de specie snel verder worden gereinigd en kan op het terrein van de intensieve landfarm een nieuwe partij specie worden gebracht.

2.3.6 Conclusies en aanbevelingen

- Intensieve landfarming is een operationele techniek die goed kan worden aangevuld met de operationele technieken 'extensieve landfarming' en 'indirecte kasfarming'. Hiermee biedt landfarming een compleet pakket voor het verwerken van met olie en PAK verontreinigde specie tot aan een volgens het Bsb toepasbare kwaliteit, of (met extensieve landfarming) uiteindelijk mogelijk tot streefwaardekwaliteit.
- Door extensieve landfarming zijn de verontreinigende stoffen die na intensieve landfarming nog aanwezig zijn, in 5 tot 40 jaar te verwijderen. Dit concept opent daarmee de weg naar multifunctionele toepassing van gereinigde baggerspecie. Een aangepast doelmatig ruimtegebruik van de locatie is daarbij aan te bevelen.
- Indirecte kasfarming maakt het mogelijk het afbraakproces aanzienlijk te versnellen. Het is onder meer mogelijk om indirecte kasfarm in te schakelen om het werk van intensieve landfarm snel (in 1 tot 3 maanden) 'af te maken,' als de buitenpercelen opnieuw beschikbaar moeten zijn.
- Directe kasfarming (specie direct in de kas na baggeren, zonder voorbehandeling op buitenpercelen) is niet kosten-effectief. Bij die aanpak versnellen beluchting en verwarming de ontwatering in onvoldoende mate.
- Afbraaksnelheden bij de verschillende landfarmproeven lopen sterk uiteen. Laboratoriumproeven zijn daarom vooraf nodig om het resultaat per specie voorspelbaar te maken. Tijdens de landfarm dient elke nazomer een uitgebreide kwaliteitsbepaling uitgevoerd te worden. Op die manier kan tijdig over de voortgang/beëindiging van de landfarm (eventueel indirecte kasfarming) worden beslist, voor het moment dat overslag lastiger wordt (de specie wordt in de winter weer natter).
- In drainagewater is geen detecteerbare PAK of olie verontreiniging aangetoond. Gezien het feit dat zelfs bij de zeer sterk verontreinigde Petroleumhavenspecie, onder mechanische beluchting, géén noemenswaardige emissies naar de lucht zijn waargenomen (zie par. 2.4), wordt aangenomen dat ook bij landfarming geen

emissies naar de lucht optreden.

- Het succes van landfarming wordt bepaald door in een zo vroeg mogelijk stadium een goede structuurvorming te bewerkstelligen (t.b.v. zuurstofindringing). Naast eigenschappen van de specie en weersinvloeden (bij de buitentechnieken) spelen mogelijke variaties in de uitvoering een rol in de structuurvorming. Onderzoek in POSW-kader verschafte inzicht in onder meer: aan te bevelen laagdiktes, perceelinrichting, duur van het ontwaterings- en rijpingsproces, mogelijkheden voor bewerking/beplanting en optimale timing van de behandeling ten opzichte van de seizoenen.
- Het voorgeschreven gebruik van HDPE-folie met drainagelaag is in de onderzochte situaties niet nodig gebleken. Een goed alternatief is een basislaag bestaande uit compost. De mogelijkheden hiertoe worden mede bepaald door de samenstelling van de onderliggende bodem. Er is reeds sprake van een praktijkgeval (Wemeldinge) waarin het toepassen van dit alternatief beleidsmatig en vergunningtechnisch werd toegestaan.

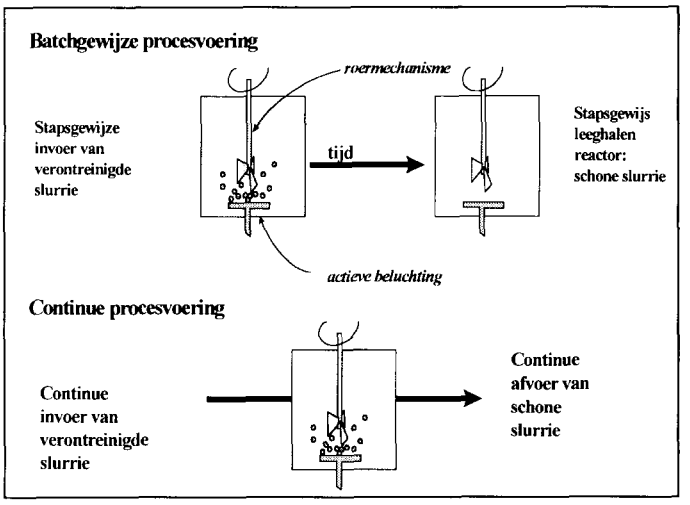
2.4 Reiniging in reactoren

2.4.1 Inleiding

Reiniging in reactoren is binnen POSW onderzocht als methode voor de aanpak van met olie en PAK verontreinigde specie. Ook gechloreerde verbindingen zouden in reactoren kunnen worden afgebroken. Naar deze mogelijkheid is binnen POSW echter geen onderzoek gedaan.

Bij reiniging in reactoren wordt specie met water verdund tot een slurrie. Deze wordt in beweging gehouden en belucht om zuurstof in te brengen die nodig is voor PAK- en olie-afbraak. Verdere stimulering van de biologische afbraak vindt plaats door middel van verwarming, pH-regeling en toeslagstoffen (o.a. nutriënten).

Figuur 13: Reiniging in reactoren



De reiniging start met een fase, waarin de bacteriën zich aan de omgeving (procescondities en specie) moeten aanpassen.
Daarna volgt de biologische afbraak volgens het bekende patroon (hfdst. 1, par. 2.3): een snelle eerste fase, gevolgd door een trage tweede fase. In de tweede fase van de afbraak adapteren bacteriën zich weer aan voedselarme condities omdat er dan weinig biobeschikbare verontreinigende stoffen over zijn.
In POSW-II zijn twee systemen van reiniging in reactoren onderscheiden: 'batch slurrie-systemen' en 'continue slurrie- systemen'.

In batch slurrie-systemen worden partijen specie afzonderlijk behandeld. Na behandeling van een partij specie wordt de reactor geleegd en met een nieuwe partij (batch) gevuld. In een continue procesvoering wordt de te reinigen slurrie met een constante snelheid ingevoerd, terwijl een continue stroom product het systeem aan de andere kant verlaat. Het continue proces biedt procesmatig voordeel, terwijl daarnaast de bacteriën ook beter gedijen bij de constante condities in dit systeem. In het algemeen verloopt de afbraak in continue systemen dan ook sneller en beter dan in batch systemen.

Aandachtspunten bij de operationalisering van reactortechnieken zijn het beluchtingssysteem (kosten-effectiviteit) en het droge stof gehalte (maximale capaciteit).

Reiniging in reactoren kan worden toegepast op specie of op de fijne fractie daarvan na scheiding (hydrocyclonage). Aan scheiden en alleen de fijne fractie biologisch reinigen zal de voorkeur gegeven worden als de grove fractie eenvoudig met fysisch/chemische technieken is te reinigen tot een toepasbare bouwstof. Ook de slijtage van de installatie die de grovere deeltjes van de specie zouden veroorzaken speelt een rol in de keuze om te scheiden.

Als alleen de fijne fractie biologisch in reactoren wordt gereinigd, is de ontwaterbaarheid van het product wel een punt van aandacht: materiaal met 30% droge stof bleek in POSW-proeven het maximaal haalbare.

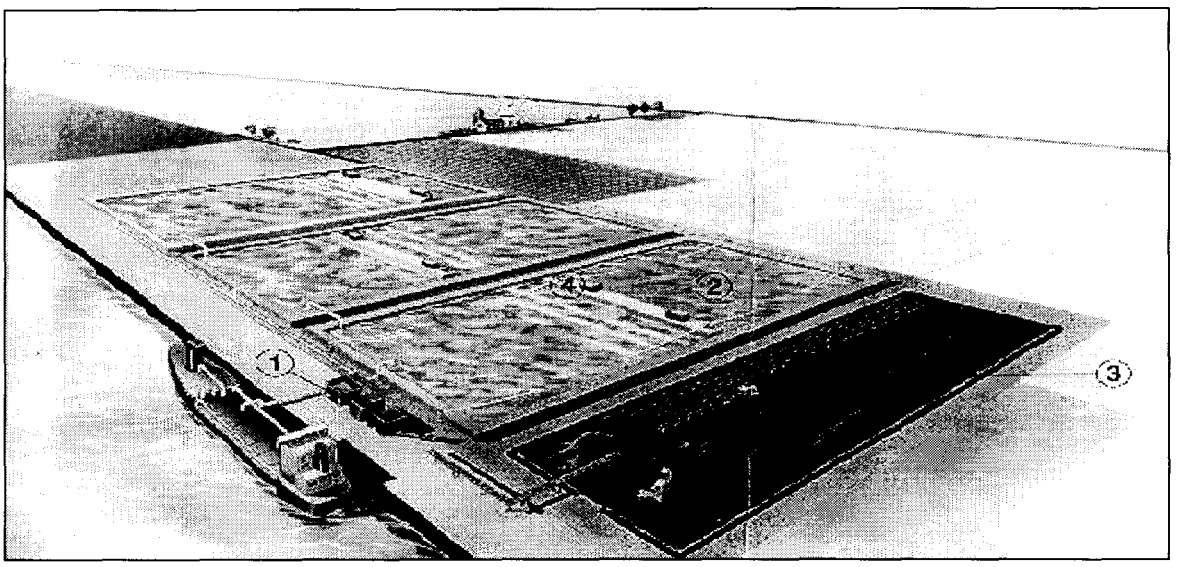
2.4.2 Onderzoeksprojecten

Binnen POSW zijn vanaf 1989 meerdere reactortechnieken beproefd, waarbij het traject van laboratorium- tot aan demonstratieprojecten is doorlopen. Aanvankelijk ging het om een groot aantal opties. In POSW-II is gewerkt aan de operationalisering van het Beluchtingsbassin als batch-systeem [16] en is een nieuwe reactor, het Slurry Decontamination Process (SDP) als continu-systeem beproefd [17]. In de derde pilotsanering van POSW (Petroleumhaven) is ook het (hieronder niet verder besproken) Fortec systeem van Heidemij (continu-systeem) gedemonstreerd [18].
Het idee van het *Beluchtingsbassin* is gebaseerd op het batchgewijs behandelen van de fijne fractie na hydrocyclonage. Door alleen de fijne fractie in behandeling te nemen kan de energiebehoefte (voor roeren en beluchten) worden beperkt. *Het Slurry Decontamination Process* (SDP) is ontwikkeld voor de reiniging van landbodems.

2.4.3 Beluchtingsbassin

Na positieve resultaten in kolomproeven en containers zijn ter optimalisering van de techniek in POSW-II proeven uitgevoerd in een pilotplant (4 m^3- schaal) met de fijne fractie van Petroleumhavenspecie (onderzoek naar beluchtingsregime en geschikt droge stofgehalte). Hierbij is gewerkt met slurries met een droge stof gehalte van 7.5 en 15% droge stof.

Figuur 14: Artist impression van een grootschalige uitvoering van het beluchtingsbassin.

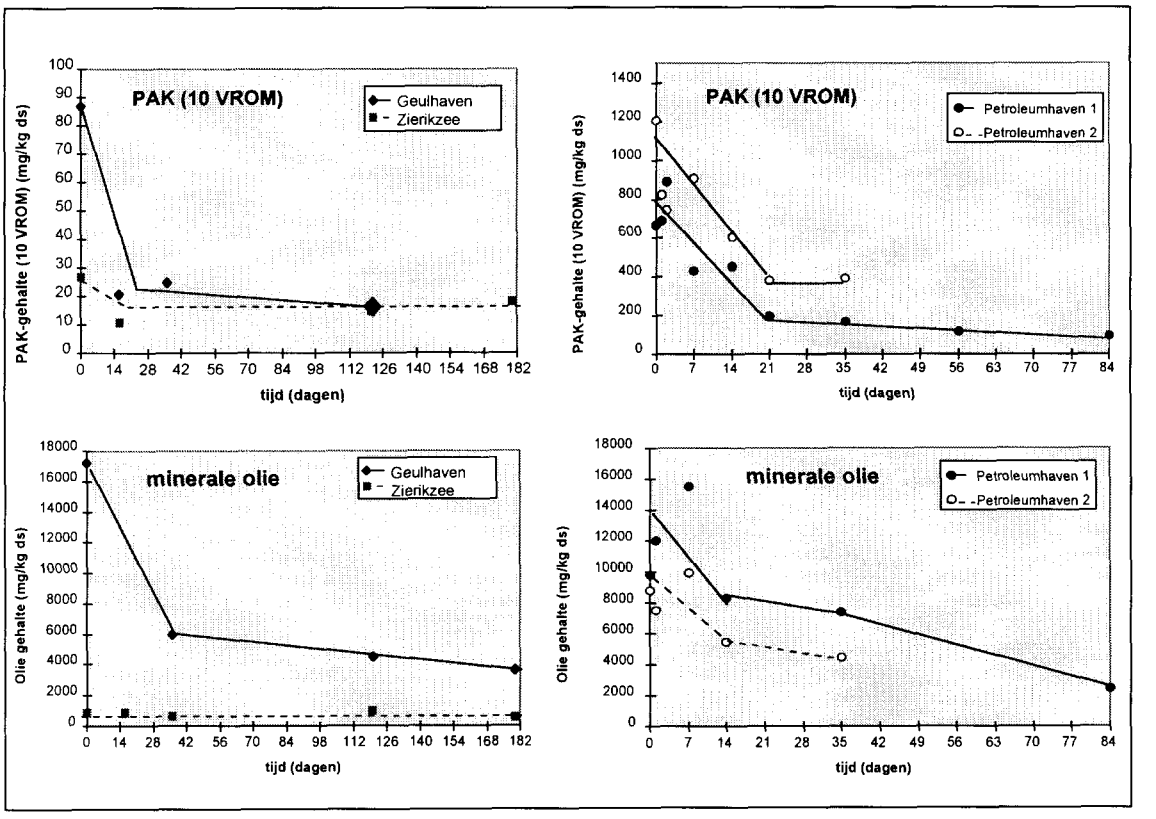


1 = aanvoer en scheiding, 2= beluchtings bassin, 3 = landfarm, 4 = ponton

Het afbraakpatroon van PAK en minerale olie in de fijne fracties bij behandeling in het beluchtingsbassin is weergegeven in figuur 15. In het Basisrapport Biologisch Reinigen [1] wordt nader ingegaan op de te behalen resultaten en afbraaksnelheden.

Evenals bij de landfarmprojecten (par. 2.3) resulteerde het proces in een twee traps afbraak. Door problemen met de beluchting (schuimvorming) is de zuurstofvoorziening - en daarmee de afbraak mogelijk niet optimaal geweest. Desondanks lag de afbraaksnelheid veel hoger dan die bij intensieve landfarming. Zo kan een afbraakresultaat dat in een buitenlandfarm enkele maanden vergt in een reactor in enkele dagen worden bereikt.
Evenals in de landfarm was de afbraak van olie in Petroleumhavenspecie gedurende een korte periode gering, om daarna weer versneld door te gaan.

Figuur 15: PAK- en olie afbraak in beluchtingsbassin voor fijne fracties van vier species.



Productkwaliteit

De kwaliteit van producten is getoetst aan het Bouwstoffenbesluit [15]. Gereinigde speciefracties voldeden (na correctie voor organisch stofgehalte) wat betreft PAK-gehalte steeds aan de norm van het Bouwstoffenbesluit. Met geen van de species (fijne fracties) werd de norm voor olie uit het Bouwstoffenbesluit gehaald.

Omdat de meeste verontreinigende stoffen zich sterk aan het (fijne) organisch materiaal binden, worden deze bij de voorafgaande scheiding vooral in de fijne fractie geconcentreerd (zie ook par. 3.1). Het te kiezen scheidingspunt is een andere mogelijkheid om te sturen in de kwaliteit van het materiaal. Ook metalen zullen bij scheiding vooral in de fijne fractie terecht komen. Of hierdoor de toepasbaarheid als bouwstof in gevaar komt - bij POSW experimenten waren er geen problemen op dit punt- kan vooraf worden bepaald.

Behalve over afbraak leverden de experimenten informatie over onder meer de ontwaterbaarheid van het eindproduct, de instelling van het beluchtingsregime, luchtemissies en eventuele door de behandeling veroorzaakte veranderingen in het uitlooggedrag van stoffen.

De zuurstofopname die in experimenten werd gemeten geeft een goede afspiegeling van de activiteit van bacteriën. De opnamesnelheid kan daarom als sturings-parameter bij de beluchtingsintensiteit worden gebruikt. Het bleek dat bij een intensieve beluchting van sterk verontreinigde baggerspecie géén belangrijke emissies naar de lucht optreden.

Uitloging en toxiciteit.

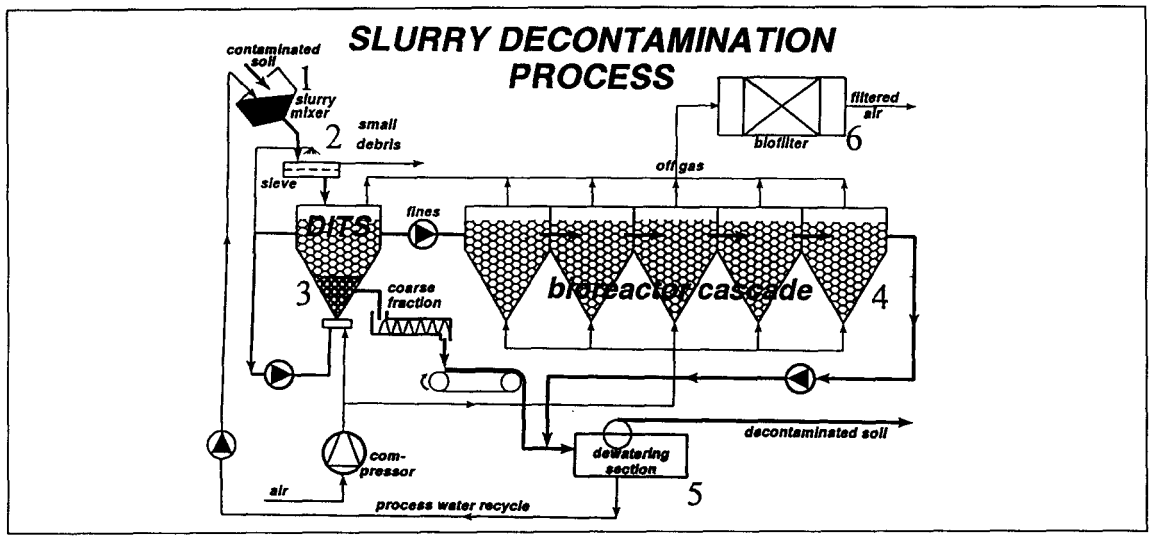
Uitloging is onderzocht voor koper, kwik, zink en PAK: vóór en ná de behandeling. De PAK loogden na de behandeling bijna niet meer uit, wat aangeeft dat inderdaad het beschikbare deel afgebroken is. De metalen

bleken (door processen als gevolg van zuurstoftoevoeging) juist een twee tot vijf maal hogere uitloging te zien gaven.
Ook de toxiciteit van de specie voor en na behandeling is onderzocht, in bio-assays. De toxiciteit werd door de behandeling slechts in beperkte mate verminderd. Het is mogelijk dat deze beperkte reductie veroorzaakt wordt door de toename in de mobiliteit van de metalen, als gevolg van de behandeling. Hierdoor wordt het positieve effect van de afbraak ten aanzien van de toxiciteit (nl. de reductie van de mobiliteit en het gehalte aan organische stoffen) weer gedeeltelijk opgeheven.

2.4.4 Slurry Decontamination Process

Deze techniek is ook geschikt voor het reinigen van (on)gescheiden specie (slurrie met 30% droge stof) en bestaat uit een serie van reactoren, waarin het materiaal onder continue procesvoering wordt gereinigd. In de eerste reactor (DITS: Dual Injected Turbulent Separation) worden grotere deeltjes afgescheiden en vindt een aanzienlijk deel van de biologische afbraak plaats. Na een verblijf in meerdere reactoren wordt de behandelde specie ontwaterd. SDP is voor de reiniging van baggerspecie in POSW-II getest in een pilotinstallatie ($3m^3$-schaal).

Figuur 16: schematische weergave van het SDP proces

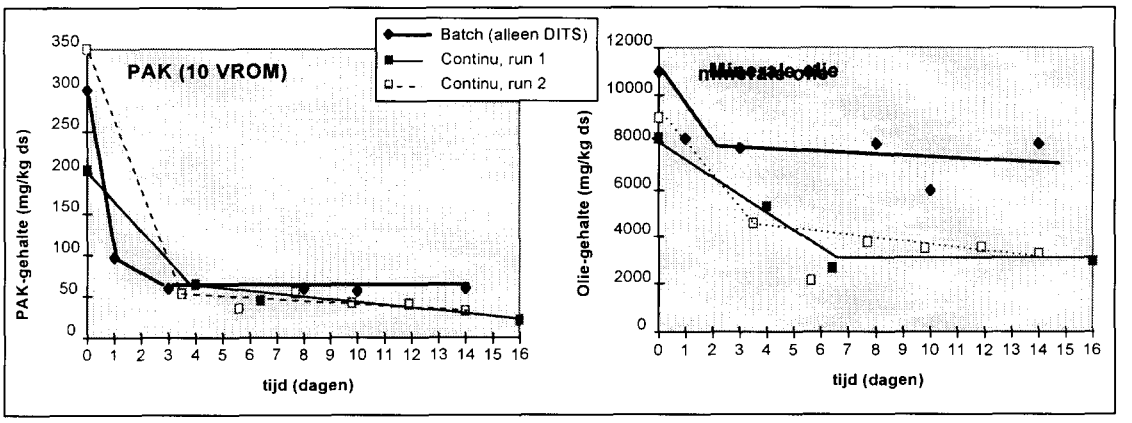


Binnen POSW is de toepasbaarheid van SDP op slib onderzocht in twee projecten met Petroleumhavenspecie. Gewerkt is met een semi-continue toevoer (dagelijks toevoeging van verse specie). Omdat de proeven aanvankelijk als batchproef werden ingezet is ook iets te zeggen over de afbraak onder die omstandigheden.
In figuur 17 wordt de PAK- en olie-afbraak grafisch gepresenteerd. De afbraak is weergegeven voor het gehele systeem en voor de batchgewijze procesvoering in de eerste reactor (DITS).

De afbraak van PAK verliep, zowel in de continue als in de batchgewijze procesvoering, uitzonderlijk snel, waarbij in de eerste (DITS) reactor al het merendeel van de stoffen werd afgebroken.

De afbraak van olie in Petroleumhavenslib vraagt (vermoedelijk wegens de vorm waarin de olie voorkomt) duidelijk meer tijd. Die tijd is er in een continue procesvoering met biocascades. De afbraak van olie verliep in de batchproef moeizaam; een bevinding die in lijn is met wat met de batchgewijze aanpak in een beluchtingsbassin werd bereikt. Petroleumhavenspecie is met het continue SDP sneller en verdergaand gereinigd dan met het beluchtingsbassin of de batch-uitvoering van SDP. De afbraaksnelheid voor PAK en olie lag een factor acht, respectievelijk drie, hoger.

Figuur 17: PAK- en olie afbraak in Petroleumhavenspecie met het Slurry Decontamination Process



Productkwaliteit.

De norm voor PAK uit het Bouwstoffenbesluit werd gemakkelijk gehaald. Het oliegehalte na behandeling bleef -evenals bij de overige biologische technieken- rond de 3000 mg/kg ds fluctueren. Paragraaf 3.1 gaat nader in op productkwaliteit.

Uitloging en toxiciteit.

De uitloging van zink en PAK verminderde door de SDP behandeling met 20, respectievelijk 99,75 procent. In bio-assays bleek de toxiciteit door de reiniging aanzienlijk afgenomen, ondanks dat het product nog een rest-toxiciteit bezat (zie ook par. 3.1).

2.4.5 Conclusies en aanbevelingen

- Het concept Reiniging in Reactoren is zodanig ontwikkeld dat het in de praktijk kan worden toegepast en door marktpartijen verder kan worden geoptimaliseerd.
- De benodigde verblijftijden zijn door de intensievere aanpak in reactoren veel korter dan bij reiniging in landfarms, afhankelijk van specie en techniek een factor 15 tot 30 korter.
- De behandeling in reactoren kan gericht zijn op het reinigen van de totale specie ofwel van de fijne fractie na hydrocyclonage. Ook kan gekozen worden voor een batchgewijze of een continue procesvoering.
- De keuze voor een behandeling van alleen de fijne fractie ligt voor de hand, indien de grove fractie goed te reinigen is met fysisch/chemische technieken die reeds operationeel zijn (flotatie, scrubben). Hierbij dient rekening gehouden te worden met de concentratie aan verontreinigende stoffen en het gehalte aan organische stof in de fijne fractie, waardoor de biobeschikbaarheid mogelijk afneemt. De keuze van het cutpoint bij de scheiding zal hierbij ook van invloed zijn. Ook is de droge stof capaciteit (% droge stof in de te reinigen slurrie) bij behandeling van de fijne fracties lager (ca. 20% ds i.p.v. ca. 30% bij ongescheiden specie) omdat de ontwaterbaarheid geringer is.
- Reiniging van ongescheiden specie is effectief indien de grove fractie moeizaam tot een toepasbaar product gereinigd kan worden. Het voordeel is dat de specie in één stap gereinigd wordt en dat de droge stof capaciteit groter is.
- De afweging tussen een batch slurrie systeem en een continu slurrie systeem als het SDP, gaat vanwege de betere procesvoering en snellere afbraak, richting continue systemen. Overigens kan ook het beluchtingsbassin eenvoudig vertaald worden naar een continue systeem voor behandeling van de fijne fracties van species. In de derde pilotsanering van POSW is de fijne fractie van de Petroleumhavenspecie in continue bioreactoren [18] gereinigd.

- Zowel het SDP als het Beluchtingsbassin vormen perspectiefrijke technieken. Het SDP is een techniek voor continue procesvoering, waarvan de dimensionering goed is uitgewerkt, voor de reiniging van zowel ongescheiden specie als alleen de fijne fractie. Het toepassingsgebied is groot omdat door de robuustheid van het systeem diverse afvalstromen (droge bodems, waterbodem, in diverse fracties) gereinigd kunnen worden. De resultaten van een test met het beluchtingsbassin waren eveneens positief. Beluchting in een bassin is een snel en efficiënt concept voor het reinigen van fijne fracties van baggerspecies met organische verontreinigende stoffen in de vorm van minerale olie en PAK.
- Emissie van schadelijke stoffen naar de lucht treedt bij reiniging in reactoren nagenoeg niet op. Zelfs bij intensieve menging en beluchting van de zwaar verontreinigde Petroleumhavenspecie vonden geen belangrijke emissies naar de lucht plaats.
- Voor bepaalde, sterk verontreinigde species kunnen de restconcentraties olie te hoog zijn om de producten als bouwstof (volgens de normen van het Bouwstoffenbesluit) toe te passen. Voor wat betreft andere stoffen kan worden voldaan aan de Bsb-eisen.

3. TOEPASBAARHEIDSASPECTEN

In hoofdstuk 2 is gekeken naar technologische aspecten en prestaties van biologische reinigingstechnieken. Hoewel deze punten de toepasbaarheid van een techniek primair bepalen, spelen voor daadwerkelijke toepassing ook andere aspecten een rol. In dit hoofdstuk worden de belangrijkste van deze 'toepasbaarheidsaspecten' besproken: productkwaliteit en marktpotentie (par. 3.1), kosten (par. 3.2) en milieu-effecten (par 3.3).

3.1 Productkwaliteit en marktpotentie

3.1.1 Inleiding

Het uitvoeren van een (biologische) reiniging is alleen zinvol als het materiaal na verwerking kan worden hergebruikt (volgens ENW) of toegepast (volgens Bouwstoffenbesluit, Bsb). Wanneer het materiaal niet aan de eisen voldoet moet de specie immers alsnog gestort worden.

Wanneer niet biologisch afbreekbare verontreinigende stoffen (zoals zware metalen) in de specie aanwezig zijn, moeten de concentraties van die stoffen in het basismateriaal op een acceptabel niveau (ENW/Bsb) liggen. Omdat een verontreiniging met meerdere typen stoffen tegelijk veelvuldig voorkomt kan biologische reiniging bij voorbaat slechts voor een deel van het totale aanbod doelmatig zijn.

Als (alleen) minerale olie en PAK verantwoordelijk zijn voor de slechte specie-kwaliteit is die kwaliteit met biologische technieken te verbeteren. Door de wijze waarop deze verontreinigende stoffen in de specie aanwezig zijn kan het echter voorkomen dat de restconcentraties aan olie en PAK boven de toepassingsnormen van het Bsb blijven liggen of dat voor een acceptabele productkwaliteit zeer lange verblijftijden nodig zijn. In hoeverre daarover voorspellingen kunnen worden gedaan, komt hieronder aan de orde.

Tevens worden in deze paragraaf restconcentraties, die in POSW-experimenten bereikt werden, getoetst aan regelgeving. Ingegaan wordt ook op de vraag in hoeverre restconcentraties een daadwerkelijke risico (uitloging en ecotoxiciteit) inhouden voor het milieu.

Naast deze zaken die de productkwaliteit betreffen komt in deze paragraaf de vraag aan de orde welk deel van het totale specieaanbod in principe met succes met biologische technieken gereinigd zou kunnen worden. Dit aanbod bepaalt ook of het voor marktpartijen aantrekkelijk is om (verdere) techniekontwikkeling en opschaling van faciliteiten ter hand te nemen.

3.1.2 Voorspelbaarheid resultaten

Voor iedere specie kan het afbraakpatroon verschillend zijn. De rol van onder meer de wijze waarop de verontreinigende stoffen aanwezig zijn werd al eerder besproken (zie o.m. hfdst. 1). De doorgaans gevonden twee-fasen afbraak hangt hiermee samen: afbraak van achtereenvolgens het licht of niet-gebonden deel en het sterk gebonden deel van de verontreinigende stoffen. Het aantal karakteristieken dat de verschijningsvorm van de stof beïnvloedt is groot. Vooralsnog kan daarom niet aan de hand van eenvoudig vast te stellen fysische of chemische parameters worden voorspeld hoe het afbraakpatroon in een specie (of een door scheiding verkregen fractie daarvan) zal verlopen.

Om een inschatting te maken of met een specie (of een door scheiding verkregen fractie daarvan) binnen een bepaalde tijd een toepasbare kwaliteit kan worden bereikt, kunnen biodegradatieproeven en desorptieproeven worden uitgevoerd. Ook de keuze van de reinigingstechniek zal van deze onderzoeksresultaten afhangen: bij een sterke binding zullen de relatief duurdere reactortechnieken niet kosten-effectief zijn. Bij reactoren wordt gedacht aan verblijftijden van enkele dagen tot weken. Als het gaat om een niet gescheiden specie en als er op of in de omgeving van de saneringslocatie ruimte beschikbaar is, is reiniging van zo'n specie met landfarm-technieken kosten-effectiever.

In *biodegradatieproeven* wordt de biologische reiniging in een aantal weken op kleine schaal (in met

bioreactoren vergelijkbare laboratorium-opstellingen) uitgevoerd. Middels een vertaalslag naar de omstandigheden in verschillende praktijkuitvoeringen (landfarming, reactoren) kunnen vervolgens de benodigde verblijftijd en de productkwaliteit bij diverse technieken worden ingeschat.

Binnen POSW is een groot aantal biodegradatieproeven uitgevoerd met als doel een testspecie te selecteren voor verdere optimalisatie van de biologische technieken [16]. De conclusie is dat de biodegradatieproeven - met een bepaalde marge - een indicatie geven van de reinigingsmogelijkheden. De benodigde verblijftijden zijn (ten opzichte van die in de proef in het laboratorium) voor landfarming (indicatief) een factor 30 hoger (maanden in plaats van dagen); voor het SDP (Slurry Decontamination Process) een factor 4 lager en voor het beluchtingsbassin ongeveer een factor 2 lager. Een verdere optimalisering en standaardisatie van de biodegradatietesten is nodig om betrouwbare voorspellingen te kunnen doen.

In *desorptieproeven* zijn (volgens een bij het RIZA ontwikkelde snelle methode [19]) specieslurries enkele dagen geschud met een middel dat verontreinigende stoffen sterk absorbeert (Tenax). Dit voortdurend 'wegvangen' van stoffen uit de waterfase, belet het ontstaan van een evenwichtssituatie en stimuleert de continue afgifte (desorptie) van gebonden stoffen. Analyse van de gehalten geabsorbeerde stoffen op verschillende momenten geeft aan wat de verhouding is tussen de licht gebonden en sterk gebonden fractie en wat de desorptie-snelheid voor elk van die fracties is.

Met deze proeven wordt per specie een indruk verkregen van de mate waarin de afbraak door de biobeschikbaarheid dan wel door de afbreekbaarheid beperkt zal worden. Desorptie-onderzoek geeft zo inzicht in de met biologische reiniging haalbare afbraaksnelheden en restconcentraties. De testen kunnen in de toekomst bruikbaar zijn bij de voorspelling van biologische afbraak of het sturen van de processen. Zo bleek de in de proeven gevonden verdeling over snel en traag desorberende fracties, vergelijkbaar te zijn met de verdeling in snel en traag biologische afbreekbare fracties, zoals die in reinigingsexperimenten met dezelfde species werd vastgesteld.

3.1.3 Productkwaliteit

Getoetst aan regelgeving

Gekeken is welke eindbestemmingen voor gereinigde specie binnen bereik komen, uitgaande van de productkwaliteit die in POSW- onderzoek met vier verschillende species is bereikt. De mogelijke eindbestemmingen van al dan niet gereinigde specie (en bijbehorende toetsingskaders) zijn: multifunctionele toepassing (streefwaardekwaliteit volgens ENW), toepassing als bouwstof in werken (volgens Bouwstoffenbesluit) ofwel storten in depot (afhankelijk van het acceptatiebeleid van depots).

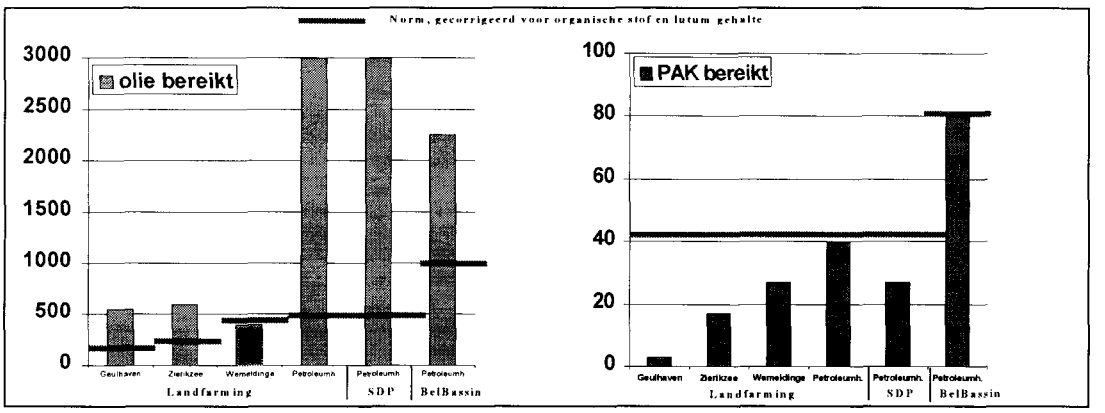
Biologische reiniging tot aan streefwaardekwaliteit ten behoeve van *multifunctioneel gebruik* is mogelijk, maar gaat (vanwege de sterke binding van een deel van de verontreinigende stoffen aan het sediment) gepaard met (zeer) lange behandelingstijden. Alleen met de techniek 'extensieve landfarming' kan deze kwaliteit mogelijk op doelmatige wijze worden behaald. Het langdurige ruimtebeslag (5 tot 40 jaar) dient hierbij gerechtvaardigd te worden met een gelijktijdig nuttig gebruik van de ruimte ('toepassing tijdens reiniging') voor bijvoorbeeld natuurbouw of energieteelt.

Met uitzondering van extensieve landfarming wordt met biologische technieken een minimale productkwaliteit nagestreefd waarmee toepassing als *bouwstof* volgens het Bouwstoffenbesluit (Bsb) mogelijk is. Voor biologisch gereinigde specie is toepassing in geluidswallen, als afdeklaag of als ophoogmateriaal van bepaalde (toekomstige) industrieterreinen denkbaar, terwijl het product in de toekomst mogelijk ook inzetbaar is in natuurbouwprojecten. Het Bouwstoffenbesluit kent samenstellingsnormen voor alle verontreinigende stoffen en

uitloognormen voor zware metalen.

In alle onderzochte species is met alle technieken de norm voor PAK (10 van VROM) gehaald (figuur 18). De Bsb-grenswaarde voor minerale olie echter, bleek nagenoeg niet haalbaar. Petroleumhavenslib bleek noch met intensieve landfarm noch in een reactor voldoende reinigbaar. Vermelding behoeft het feit dat de bepaalbaarheidsgrens voor minerale olie dicht bij de betreffende Bsb-grenswaarde ligt. Daardoor kunnen analyse-fluctuaties ook van invloed zijn op het oordeel bij toetsing aan de Bsb-normen.

Figuur 18: Eindresultaat van diverse biologische reinigingen, getoetst aan Bsb grenswaarde.

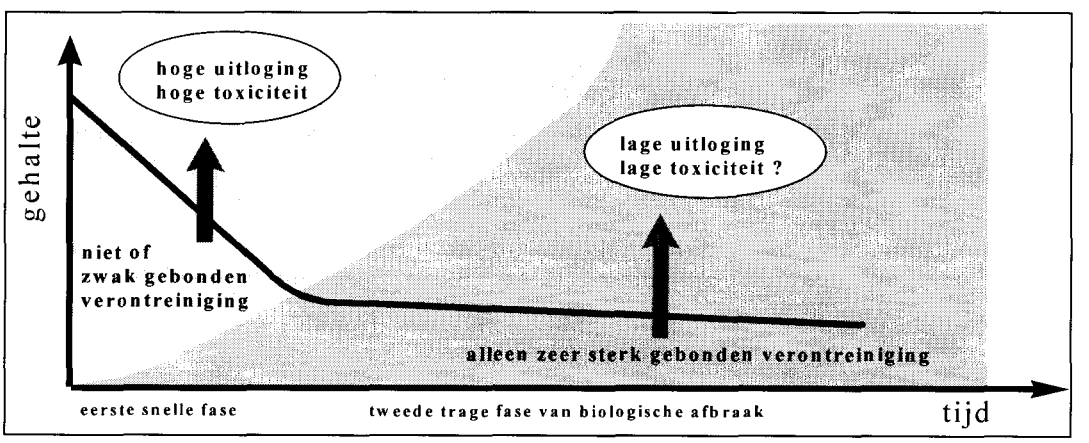


Het Bouwstoffenbesluit kent normen voor de uitloging van metalen. Met inhomogene materialen, zoals ongescheiden baggerspecie, zijn de testen ter bepaling van die uitloging echter niet praktisch uitvoerbaar omdat de kolommen dichtslaan. Alternatieve uitloogtesten zijn in ontwikkeling maar er bestaat nog geen officiële procedure om de resultaten van deze schudtesten te vertalen naar de Bsb-uitloogeisen. In de alternatieve uitloogtest, uitgevoerd met Petroleumhavenspecie, werden de Bsb-uitloognormen niet overschreden.

Onderzoek werkelijke milieurisico's

In de regelgeving wordt -behoudens via enkele correcties- geen rekening gehouden met de variaties in de verschijningsvorm en bindingsvorm van verontreinigende stoffen in het materiaal. Omdat juist die factoren sterk kunnen meespelen bij het milieueffect van een bepaalde verontreiniging is naast bovenstaande toetsing ook gekeken naar daadwerkelijke risico's van species.

Figuur 19: Relatie tussen biobeschikbaarheid en risico's.



De hypothese (figuur 19) is dat bij aanvang van de reiniging een groot deel van de verontreiniging goed beschikbaar (mobiel) is en ecotoxicologische effecten kan hebben. Echter, wanneer de eerste fase van de

biologische afbraak doorlopen is, zouden alleen nog sterk gebonden verontreinigende stoffen -en een gering ecotoxicologisch effect- over zijn.
Om deze hypothese te toetsen zijn de verspreidingsrisico's in uitloogtesten gemeten en zijn ecotoxicologische effecten onderzocht in bio-assays. Deze testen werden vóór en ná biologische behandeling uitgevoerd. Een samenvatting van de resultaten ten aanzien van de *uitloging* van PAK, olie en zware metalen wordt in tabel 2 gegeven.

Tabel 2: Percentage vermindering in uitloging (U) en concentratie © door biologische reiniging.

Techniek en specie		PAK-U	PAK-C	Olie-U	Olie-C	Metaal-U
Extensieve landfarming						
Geulhavenspecie,	van 1 tot 2 jr.	33%	18%			
Zierikzeespecie,	van 1 tot 2 jr.	-40% (!)	89%			
Intensieve landfarming						
Wemeldingespecie,	van 0 tot 1 jr.	43%	25%			
Petroleumhavenspecie,	van 0 tot 1 jr.	44%	81%			
Beluchtingsbassin (fijne fractie)						
Petroleumhavenspecie,	van 0 tot 12 wkn.	98%	69%			
SDP						
Petroleumhavenspecie,	van 0 tot 2 wkn.	99.7%	93%			
Petroleumhaventesten (bioreactoren)						
1 totale specie		98%	69%	49%	67%	-260% (!)
2 fijne fractie		95%	89%	91%	91%	-680% (!)
3 fijne fractie		97%	84%	86%	86%	-500% (!)

(!) = opgelet: verhoogde uitloging

PAK: Voor alle species bleek zowel vóór als ná de reiniging slechts een klein deel (<1 % tot 5%) van de aanwezige PAK uit te logen (resultaten niet in tabel 2). Biologische reiniging leidde steeds tot een sterke reductie van deze uitloging, waarbij variaties per specie en per techniek vielen waar te nemen. Wanneer de eerste-fase afbraak nog niet volledig is (na 1 jaar landfarmen van Petroleumhaven- en Wemeldingespecie) was de uitloging in beperkte mate verminderd. Bij species die reeds ver in de tweede fase van de afbraak waren (Geulhaven en Zierikzee) waren zowel het gehalte als de uitloging gering afgenomen: alle sterk gebonden PAK waren reeds verwijderd. De sterkste reductie (98 tot ruim 99%) vond plaats tussen het startmoment en de afronding van de eerste fase (Petroleumhavenspecie in beluchtingsbassin of SDP). Hier was duidelijk te zien dat de uitloging sterker verminderde dan het gehalte (circa 98% uitloog vermindering versus 70 - 85% afbraak). Deze resultaten zijn in overeenstemming met de hypothese, dat de biologische afbraak alle goed beschikbare (uitloogbare) PAK verwijdert.

Olie en metalen: De uitloging van minerale olie en metalen werd alleen in de testen met Petroleumhavenspecie gemeten. De uitloging van olie verminderde weliswaar met circa 50 tot 90 % maar was in sommige gevallen nog relatief hoog. Zeer opvallend is dat de uitloging van zware metalen door de biologische behandeling vergroot werd (factor 2.5 tot 5.5). Ondanks de verhoging, werden de vanuit de schudtesten berekende emissienormen van het Bouwstoffenbesluit niet overschreden. De verklaring voor de zware metalen uitloging wordt gezocht in het aërobe milieu dat voor de biologische reiniging nodig is. In aanwezigheid van zuurstof kunnen chemische processen de mobiliteit van de metalen vergroten.

Toxiciteit: Bepaling van de (daadwerkelijke) *toxiciteit* is binnen POSW met behulp van bio-assays met drie testorganismen uitgevoerd. Voor zoete species (Geulhaven en Zierikzee) werden de watervlo, de muggelarve en de photobacterie gebruikt, voor zoute species (Wemeldinge en Petroleumhaven) werden de oesterlarve, de

slijkgarnaal en de photobacterie ingezet. De resultaten worden samengevat in tabel 3, waarbij de resultaten van de drie testen zijn gemiddeld.

Tabel 3: Overzicht van resultaten bio-assays biologische technieken

Techniek	Specie	Begin toxiciteit	Eind toxiciteit	Opmerking
Landfarming	Geulhaven	75%	25%	na 5.5 jr
(totale specie)	Zierikzee	50%	33%	na 5.5 jr
	Wemeldinge	40%	4%	na 1 jr
	Petroleumhaven	100%	100%	na 1 jr
Beluchtingsbassin (fijne fractie)	Petroleumhaven	100%	75%	na 12 wk
SDP (totale specie)	Petroleumhaven	100%	33%	na 2 wk
Bioreactor 1 (totale specie)	Petroleumhaven	100%	65%	na 2 wk
Bioreactor 2 (fijne fractie)	Petroleumhaven	100%	65%	na 3 mnd
Bioreactor 3 (fijne fractie)	Petroleumhaven	100%	65%	na 1 mnd

Toxiciteit weergegeven in percentages (100% = volledig toxisch), waarbij de resultaten van drie testen gemiddeld zijn.

De biologische behandelingen leiden in alle gevallen tot afname van de toxiciteit. Voor één van de species geldt dat de toxiciteit binnen één jaar landfarming bijna is verdwenen. In de overige species blijft een resttoxiciteit (25 - 65%) aanwezig, alleen in de landfarm met Petroleumhavenspecie (de afbraak was daar nog niet ver gevorderd) blijft de toxiciteit volledig. De conclusie luidt dat biologische reiniging leidt tot een vermindering in de toxiciteit, doch niet in een totale verwijdering. De resttoxiciteit van de behandelde species is wellicht terug te voeren op een verhoogde mobiliteit van de metalen. Mogelijk vormt anaërobe toepassing van biologisch gereinigd materiaal een oplossing.

Nadere aandacht verdienen de keuze van testorganismen (de gevoeligheid van de testorganismen bleek verschillend) en het wegen van de resultaten (nu zijn de resultaten van de drie testen eenvoudigweg gemiddeld om te komen tot een totaalscore).

3.1.4 Potentiële markt

Uitgaande van de verwachte hoeveelheid en kwaliteit van Nederlandse baggerspecie [5], is een inschatting gemaakt van de potentiële markt voor biologische technieken. Het zal slechts gaan om een deel van het totale aanbod: de specie waarin (alleen) afbreekbare verontreinigende stoffen in ontoelaatbare concentraties voorkomen. In tabel 4 staat, uitgaande van een aantal aannames een overzicht van het specieaanbod en het biologisch reinigbare deel.

Tabel 4: Marktindicatie voor biologische verwerking baggerspecie in miljoenen kubieke meters

	totaal	PAK/olie		Cl-omive		totaal organisch	
Klasse	totaal aanbod	aanbod	biologisch reinigbaar	aanbod	biologisch reinigbaar	aanbod	biologisch reinigbaar
klasse 3+4	125,7	12,0	(85%) 10.2	14,6	(50%) 7.3	26,6	17.5 (=14% k3/4)
klasse 1+2	109,8	55,1	(50%) 27	13,9	(25%) 3.5	69,0	30.5 (=28% k1/2)
totaal	235,5	67,1	37.2	28,5	10.8	95,6	48 (=20% totaal)

Op basis van het verwachte [5] totale aanbod tot het jaar 2010 en het aandeel daarvan waarin de organische verontreinigingen klassebepalend zijn.
omive: organische microverontreinigingen, Cl-omive: gechloreerde organische microverontreinigingen.

Biologische reinigingstechnieken zouden theoretisch voor circa 20% van het totale aanbod aan klasse 1, 2, 3 en

4 specie een oplossing kunnen bieden. Door scheiding van specie in deelstromen waarbij scheiding van verontreinigende stoffen optreedt, is het mogelijk dat deelstromen biologisch reinigbaar worden. Twintig procent blijft een schatting gezien de aannames en de mogelijke veranderingen in het aanbod. Indien alleen klasse 3 en 4 specie wordt beschouwd bedraagt dit percentage circa veertien procent. Ondanks de vele aannames bij deze schattingen lijkt het potentiële aanbod voldoende groot om tot een marktontwikkeling van biologische verwerkingstechnieken te komen. De toepassing van biologische technieken past daarmee goed in het nationale beleid dat is gericht op het verwerken van 20% van het totale specieaanbod in het jaar 2000.

3.1.5 Conclusies en Aanbevelingen

Voorspelbaarheid resultaten.

- De bindingsmechanismen en de verschijningsvorm van de verontreinigende stoffen zijn belangrijke factoren in de biologische afbraak. Ze kunnen in elk sediment anders zijn en daarmee variëren ook het afbraakpatroon, de benodigde verblijftijd en de productkwaliteit.
- Niet voor alle typen specie zal een toepasbare productkwaliteit binnen een kosten-effectieve periode haalbaar zijn. Voor elke specie afzonderlijk moet daarom vooraf een inschatting worden gemaakt van het te verwachten resultaat.
- Ook al moet verder onderzoek het inzicht in de belangrijke factoren vergroten; de voorspelbaarheid is momenteel geen hindernis voor de toepassing van biologische technieken. De resultaten van biodegradatieproeven in het laboratorium kunnen binnen een bepaalde marge een indruk geven van de te behalen resultaten in de praktijk. Restconcentraties zullen vergelijkbaar zijn in proef en praktijk; verblijftijden zullen afwijken met een factor die globaal per techniek valt aan te geven.
- Testen waarin de desorptie wordt gemeten, geven binnen enkele dagen een beeld van de beschikbaarheid van de verontreiniging (desorptie-snelheden en grootte van de licht- en sterk gebonden fracties) en daarmee de maximaal haalbare restconcentraties bij biologische reiniging.

Productkwaliteit.

- Biologische verwerkingstechnieken kunnen toepasbare producten (bouwstoffen volgens Bouwstoffenbesluit, Bsb) opleveren. Het behalen van de samenstellingsnorm voor minerale olie, kan hierbij voor sommige species een knelpunt vormen. Een nadere onderbouwing (risico's, ecotoxiciteit) voor deze norm wordt aanbevolen.
- De bepaling van het gehalte aan minerale olie wordt vaak verstoord door humuszuren. Deze worden in de chromatogrammen als minerale olie gezien, waardoor een overschatting van het oliegehalte gegeven wordt. Door het verhogen van het florisil gehalte (tot 15%) tijdens de clean-up stap, kan dit probleem deels opgelost worden. Een betrouwbare bepaalbaarheidsgrens van minerale olie ligt rond de 500 mg/kg ds [20].
- Door biologische reiniging wordt de uitloging van PAK (en olie) sterk verminderd. Het gebruik van bioassays, een methode om ecotoxiciteit van specie en verwerkingsproducten te onderzoeken, vraagt nog nadere discussie (uitvoering en interpretatie). De proeven binnen POSW wijzen op een afname van de ecotoxiciteit als gevolg van biologische behandeling. Deze afname was minder sterk dan de afname in uitloging van PAK en olie, wellicht als gevolg van een verhoogde mobiliteit van metalen die biologische behandeling kan veroorzaken.
- De resultaten van onderzoek naar metalen-uitloging (uitgevoerd met een van de species) wijzen niet op een overschrijding van de uitloognormen die het Bouwstoffenbesluit ten aanzien van deze stoffen stelt. De gehanteerde alternatieve (voor baggerspecie geschikte) onderzoeksmethode (CEN-test) behoeft nog formele goedkeuring.

- Bij de kwaliteitsbeoordeling van baggerspecie zouden behalve de chemische samenstelling ook het uitlooggedrag van stoffen en toxiciteitsmetingen moeten worden beschouwd. De relaties tussen deze parameters dienen in beeld gebracht te worden.
- De metaalgehalten in de specie mogen de toepassing volgens het Bouwstoffenbesluit niet in de weg staan. Het metaalgehalte dient daarom vooraf bepaald te worden om de toepassingsmogelijkheden vanuit dit perspectief in te schatten.
- Wanneer alleen de fijne fractie (na hydrocyclonage) met biologische technieken in behandeling wordt genomen, dient met een zorgvuldige keuze van het scheidingspunt (deeltjesgrootte) te worden voorkomen dat een overschrijding van de grenswaarde voor metalen of hogere PAK optreedt.

Markt.

- Van de totale hoeveelheid baggerspecie kan theoretisch ongeveer 20% effectief middels biologische technieken verwerkt worden. Uitgaande van alleen klasse 3 en 4 specie bedraagt het theoretisch aandeel van biologische reiniging circa 14%.
- Deze potentiële markt is nog afhankelijk van wijzigingen in het totale aanbod en techniek-ontwikkelingen. Door voorbehandelingen van specie kan het aandeel mogelijk verhoogd worden.
- Een potentieel met biologische technieken te verwerken hoeveelheid specie ter grootte van -globaal- een vijfde van het totale aanbod biedt de markt perspectief om biologische technieken verder te ontwikkelen. De toepassing van biologische technieken past daarmee goed in het nationale beleid dat is gericht op het verwerken van 20% van het totale specieaanbod in het jaar 2000.

3.2 Kosten

3.2.1 Inleiding

Naast de haalbare productkwaliteit, vormen de kosten een belangrijk aspect ten aanzien van de (grootschalige) toepassing van verwerkingstechnieken. Gezien de verwachte grote hoeveelheden verontreinigde baggerspecie in ons land, dienen de kosten laag te zijn om de verwerking betaalbaar te maken. Binnen POSW is door diverse opdrachtnemers van afzonderlijke projecten kostenberekeningen gemaakt. Daarnaast zijn overkoepelende berekeningen uitgevoerd, voor de vergelijking van kosten tussen diverse technieken. Deze paragraaf gaat in op de overkoepelende berekeningen ten aanzien van biologische verwerkingstechnieken. Eerst worden de uitgangspunten besproken, waarna de resultaten en de conclusies aan de orde komen.

3.2.2 Uitgangspunten

In de berekening van de kosten van (biologische) reinigingstechnieken moeten, onder andere door het ontbreken van voldoende praktijkgegevens hieromtrent, uitgangspunten gekozen worden. Dat betreft enerzijds financiële uitgangspunten, bijvoorbeeld met betrekking tot de wijze van investeren, de afschrijvingstermijn, de restwaarde en de gehanteerde rente. Anderzijds spelen ook technische uitgangspunten als schaalgrootte, ruimtebeslag en energieverbruik. Bij biologische technieken is daarnaast een zeer belangrijke factor de (bandbreedte in de) benodigde verblijftijden.

Na een reeks calculaties per project is ten behoeve van een onderlinge vergelijking van de kosten van biologische technieken begin '97 een overkoepelende calculatie gemaakt, waarbij voor elke techniek dezelfde financiële uitgangspunten en de meest actuele technologische uitgangspunten zijn gehanteerd [21]. Hierbij is zo veel mogelijk vastgehouden aan de uitgangspunten van de Haalbaarheidsstudie Grootschalige Baggerspecie-verwerking [2]. In die POSW-II brede, overkoepelende studie zijn (onder meer) reinigingskosten in beeld gebracht van diverse technieken, waaronder één biologische techniek (landfarming).

Een aantal belangrijke financiële uitgangspunten staat in tabel 5. Voor andere uitgangspunten (informatie over de ingecalculeerde investerings- en exploitatiekosten) is het Basisrapport Biologisch Reinigen [1] te raadplegen.

Tabel 5: Enkele financiële uitgangspunten bij de kostencalculatie

	Rente: 8%	
	Afschrijvingstermijnen	**Restwaarden**
civiel	20 jaar	negatieve opruimkosten
mechanisch	10 jaar	0%
rollend materieel	5 jaar	10%

Een van de technologische uitgangspunten betreft de jaarcapaciteit van installaties (kosten zijn onder meer afhankelijk van de uitvoeringsschaal). Bij de berekening is voor elke techniek uitgegaan van de verwerking van 50.000 ton droge stof per jaar. Wat betreft het droge stof-gehalte van de opgebaggerde specie is uitgegaan van 45% ds. De kwaliteit van het ingevoerde materiaal is gesteld op klasse ¾ of BAGA voor olie en PAK, de productkwaliteit moet toepassing als bouwstof (Bouwstoffenbesluit) toelaten.

Er is niet met opbrengsten of kosten uit de afzet van deze producten gerekend. Het droge stof-gehalte in de installatie zal per techniek verschillen. Een hoog gehalte is gunstiger ('geconcentreerde verwerking') dan een laag gehalte. Hier moesten op basis van de beschikbare kennis en ervaring waarden worden ingevuld als

uitgangspunt voor de berekeningen.

Het zelfde geldt voor de verblijftijden, een factor die een zeer grote invloed heeft op de kosten. Omdat deze verblijftijden niet alleen per techniek verschillen maar ook per te behandelen specie is per techniek met een minimale en een maximale verblijftijd gerekend, resulterend in een bandbreedte waarop de kosten zullen liggen. In tabel 6 is nader aangegeven met welke 'verblijftijden' en 'droge stof-gehalten in installatie' bij diverse technieken is gerekend.

3.2.3 Berekende verwerkingskosten

In tabel 6 worden de resultaten van de kostenberekening van de biologische technieken [21] gepresenteerd. De kosten per ton droge stof variëren van circa 44 - 62 gulden voor landfarming tot aan 68 - 82 gulden voor reactor-technieken. Het verschil in de kosten tussen landfarming en reactortechnieken is veel kleiner dan een aantal jaren geleden werd aangenomen. De prijs van de reactortechnieken is gedaald omdat verblijftijden korter, en werkbare droge stofgehalten zijn dan in het verleden werd ingeschat.

De belangrijkste kostenposten voor intensieve landfarming liggen in de investeringskosten voor drainagezand en folie (ca. 75% van investering). Landfarming met compost als onderlaag kan tot circa 50%-reductie van de investeringskosten leiden en de kostprijs verlagen van ruim 40 tot ruim 35 gulden per ton droge stof.

Tabel 6: Resultaten kostenberekeningen biologische technieken [20]

	LANDFARMING				BIOREACTOREN		
Techniek:	Intensief met folie/ drain	Intensief met compost	Extensief met compost	Kasfarm indirect	Batch fijne fractie	Continu fijne fractie	Continu totale specie
Verblijftijd	1.5-2.5 jr.	1.5-2.5 jr	5-15 jr.	1-3 mnd.	14-28 dgn.	8-16 dgn.	8 - 16 dgn.
d.s. gehalte in installatie (tds/m3)	0.58	0.58	1.27	0.84	0.2	0.2	0.3
Kapitaalslasten	16-25	9.2-13.0	10.3-27.7	7.11-15.6	19.7-25.8	18-22	12-14.5
Terreinhuur (fl.1,2/m^2)	4.7-7.1	4.7-7.1	5.5-16.4	0.16-0.39	0.08-0.15	0.06-0.1	0.04-0.07
exploitatie3)	11.9-14.7	10.55-1.4	1.58-5.21	9.8-20.89.	34.19-39.49	34.52-39.42	34.52-39.42
monitoring	6.0-7.2	6.0-7.2	6-10.8	6-7.2	5.7-6.15	5.1-5.1	5.1-5.1
overig	5.7-7.8	4.9-5.6	4.65-7.85	3.1-4.3	8.9-10.1	8.7-9.7	8.7-9.7
totaal	44.3-61.8	35.5-44.4	32.5-68 22.5-40.3(2)	26.25-36.45	68.6-81.7	66.4-76.3	60,4-69

Kosten uitgedrukt in guldens per ton droge stof, bij verwerking van 50.000 tds per jaar, voor korte en lange verblijftijden. De kosten en eventuele opbrengsten van de afzet van producten zijn niet meegenomen.
Voor extensieve landfarming is gerekend met situaties waarbij wel en niet rekening gehouden moet worden met terreinkosten. Voor het overige wordt verwezen naar het Basisrapport Biologisch Reinigen.

(1) Kosten voor ontwatering van fijne fracties vóór behandeling, alsmede voor hydrocyclonage zijn niet meegenomen. De kosten van de ontwatering van slurries na behandeling zijn wel meegenomen.
(2) Kosten zonder post voor terreinhuur
(3) Exploitatie: energie, personeel, rollend materieel, onderhoud en afvoer

3.2.4 Consequenties voor de techniekkeuze

Vanwege het relatief kleine verschil in de kosten voor landfarm- en reactortechnieken, is een breder overzicht

gegeven (tabel 7) van de aspecten die de keuze tussen de biologische technieken beïnvloeden.

Dit zijn -naast kosten- speciekarakteristieken en ruimtebeslag. Daarbij is ook de benodigde investering zichtbaar gemaakt omdat deze (ondanks het feit dat ze in verwerkingsprijzen zijn ingecalculeerd) op zichzelf een obstakel kunnen vormen.

Ondanks de relatief lage kostprijs kan het ruimtebeslag in bepaalde situaties een belemmering vormen voor landfarming. Het voordeel van landfarming is dat deze minder specialistische kennis vraagt in de uitvoering. De techniek kan ook flexibeler worden ingezet (een groot aantal kleinere inrichtingen decentraal, nabij probleemgebieden, versus grotere installaties met een meer centraal karakter). Bij reactortechnieken zouden vergunningsprocedures meer belemmerend kunnen werken bij de realisatie van de activiteit.

Tabel 7: Nadere beschouwing van aspecten die de techniekkeuze beïnvloeden

techniek	specie	tds/m^3	(1) volume (m^3)	(2) ruimte (m^2)	kostprijs fl/tds	investering Mfl
landfarming folie/drain	ongescheiden	0.6 (45% ds)	130.000	198.400	45	6.3
landfarming compost	ongescheiden	0.6 (45% ds)	130.000	198.400	35	2.7
Continu slurrie 20% ds	fijne fractie < 63 um	0.25 (20% ds)	200.000	2.350 28.200 (*)	66 (nb)	7.5
continu slurrie 30% ds	ongescheiden	0.4 (30% ds)	125.000	1.715 20.580 (*)	60 (nb)	7.5

Uitgerekend voor de kortste verblijftijd en een capaciteit van 50.000 tds/jr

(*) Voor de reactortechnieken is ook voorgerekend wat het ruimtebeslag bij een capaciteit van 50.000 tds/maand zou zijn.

(1): Het te bewerken volume aan verontreinigde specie of slurrie, (2): Het daarvoor benodigde oppervlak voor de installaties, inclusief werk-oppervlak

3.2.5 Conclusies en aanbevelingen

- Ondanks de variaties in de opzet van diverse kostenberekeningen, worden voor landfarming steeds kosten in de ordegrootte van 45 gulden per ton droge stof als resultaat verkregen. De belangrijkste kostenposten zijn de huur of de aankoop van terreinen (12% van de totale kosten) en de onderafdichting met folie en drains (17% van de totale kosten). Voor het laatste is een voorziening met compost een goed en kostenbesparend alternatief, indien de lokale bodemgesteldheid een dergelijke inrichting niet in de weg staat.
- Met reactortechnieken, uitgevoerd als continuproces, komen berekeningen uit op 60 tot 76 gulden per ton droge stof. Hier vormen de ontwatering en het energieverbruik de belangrijkste kostenposten.
- De uitkomsten van de kostenstudie laten een geringer prijsverschil tussen landfarm- en reactortechnieken zien dan enkele jaren gelden verwacht werd. Kosten lijken daarom relatief minder belangrijk te worden in de keuze tussen deze technieksoorten. Als commerciële marktprijzen in concrete situaties dit bevestigen, zullen het tijd- en ruimtebeslag en de benodigde procedures een belangrijkere rol gaan spelen. Ook kan de keuze sterker bepaald worden door de gewenste mate van flexibiliteit (inzetbaarheid van de techniek nabij de baggerlocatie en het effect op de transportkosten), de rol die de probleembezitter zelf wil spelen en de eigenschappen van de specie in kwestie.

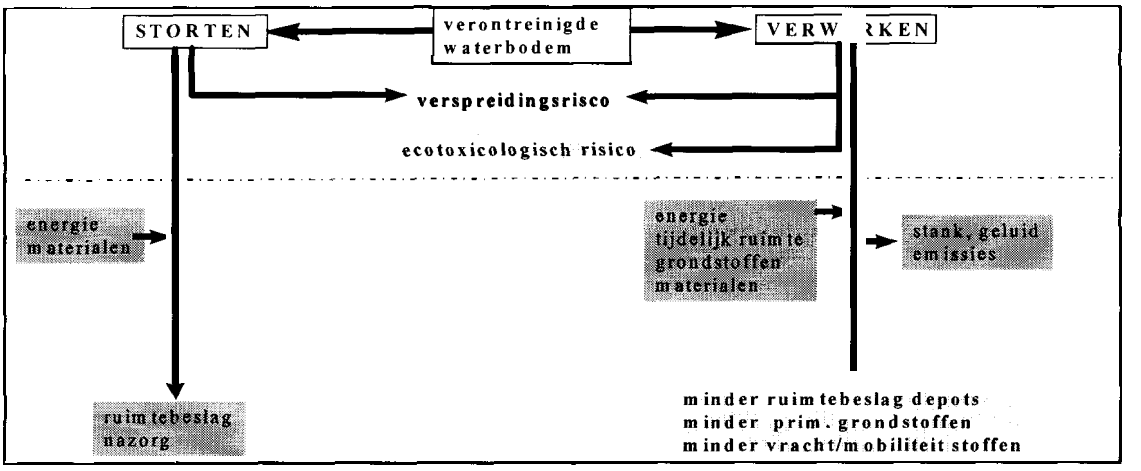
3.3 Milieu-effecten

3.3.1 Inleiding

De laatste jaren is bij veel productieprocessen en producten de aandacht voor het milieu sterk gegroeid. In diverse sectoren wordt gesteld dat de welvaart (economie, consumptie) niet ten koste mag gaan van het milieu. Men zoekt naar duurzame oplossingen.
Het spreekt voor zich dat deze aandacht voor het milieu zeker bij activiteiten die worden uitgevoerd om het milieu te beschermen, aanwezig moet zijn. Zo mag ook de aanpak van de verontreinigde waterbodems niet leiden tot het verschuiven of creëren van milieuproblemen.

Het doel van de aanpak van de verontreinigde waterbodem is het minimaliseren van de risico's voor het milieu (ecotoxicologische effecten, verspreiding van stoffen).
Om dit resultaat te bereiken, worden diverse behandelingen (baggeren, transport, verwerken, storten, hergebruik) uitgevoerd. Deze activiteiten doen vaak een beroep op andere milieu-aspecten, zoals bijvoorbeeld energieverbruik, of het ontstaan van emissies. Dit wordt het milieu*gebruik* genoemd. Figuur 20 geeft een beeld van de gewenste resultaten en mogelijk milieu*gebruik* van waterbodemingrepen.

Figuur 20: Positieve (lichte vlakken) en negatieve (donkere vlakken) milieuaspecten bij waterbodemingrepen



De totale milieubalans (gewenst resultaat / benodigd milieu*gebruik*) dient bij de aanpak van de waterbodems bij voorkeur positief te zijn.
Daarnaast is het mogelijk dat zowel het milieu*gebruik* als het haalbare resultaat, kan verschillen per type verwerkingstechniek. Dit betekent dat de milieu-aspecten, naast de kosten, een belangrijke afwegingsfactor vormen, die de keuze tussen verwerkingstechnieken zal beïnvloeden. De goedkoopste techniek hoeft daarom niet altijd de meest gewenste te zijn.

Ondanks het belang dat aan milieu-gerelateerde aspecten gegeven wordt, blijft dit thema vaak een subjectief karakter hebben. Binnen POSW (zie het Eindrapport Milieueffecten [22]) is dan ook aandacht besteed aan:

- het inventariseren van voor waterbodemingrepen relevante milieuaspecten;
- het meten van het milieugebruik bij diverse technieken, tijdens het ontwikkelingstraject;
- het ontwikkelen van een methode voor het beoordelen van de milieu-effecten.

In deze paragraaf wordt een korte uitleg gegeven van de beoordelingsmethodiek en vervolgens wordt in gegaan

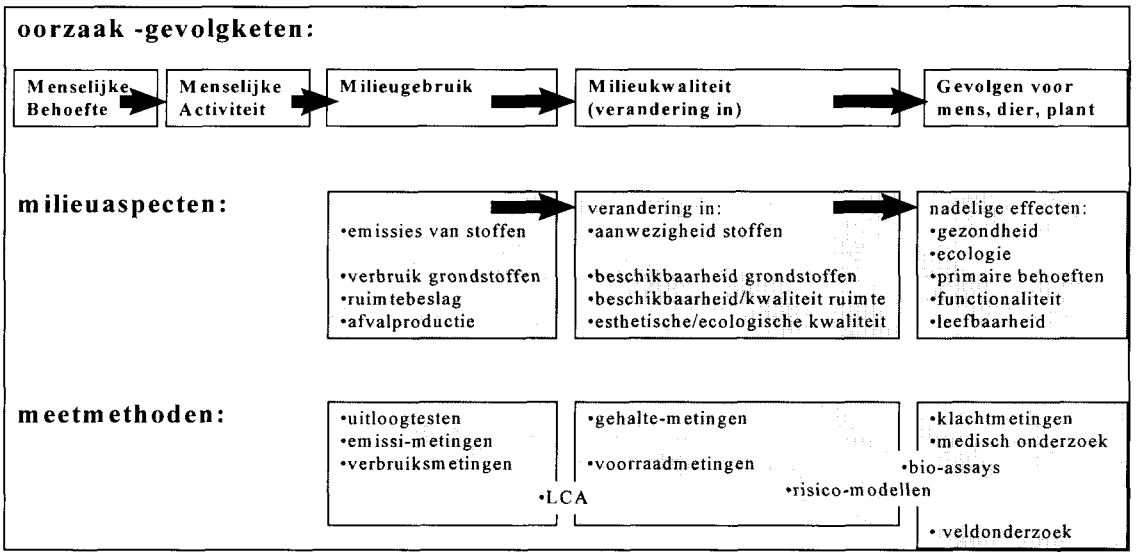
op de milieuaspecten van biologische technieken.

3.3.2 Milieubeoordeling binnen POSW

Er bestaan veel soorten milieueffecten, die divers van aard zijn en op verschillende niveaus in de zogenaamde *Oorzaak-Gevolg-Keten* liggen. Figuur 21 geeft deze keten aan, met de daaronder gelegen milieuaspecten en de mogelijkheden om deze aspecten te kwantificeren.

De keten start met de menselijke behoefte, waarna een kettingreeks aan gevolgen plaats vindt. De behoefte om het milieu te beschermen leidt tot de menselijke activiteit om een waterbodem te saneren. Deze activiteit leidt tot milieu*gebruik* (bijvoorbeeld emissies van stoffen of energieverbruik), waardoor de milieu*kwaliteit* verandert (de aanwezigheid van verontreinigingen in het milieu of de uitputting van energiebronnen). De veranderde milieu*kwaliteit* leidt uiteindelijk tot gevolgen voor mens en ecosysteem (bijvoorbeeld ecotoxicologische effecten of ziekte).

Figuur 21: De oorzaak-gevolg keten met onderliggende milieuaspecten en meetmethoden.



Bij de milieubeoordeling zijn we in feite geïnteresseerd in aspecten die zo ver mogelijk naar rechts in de oorzaak-gevolg keten liggen. Immers, de emissie van een bepaalde stof hoeft niet erg te zijn indien hieruit geen nadelige effecten voor mens en ecosysteem ontstaan. Het dilemma is dat juist voor de aspecten die ver naar rechts in de keten liggen, onvoldoende meetmethoden aanwezig zijn of dat een meerjarige monitoring benodigd is.
Een van de redenen waarom er vaak spraakverwarring optreedt tijdens discussies omtrent milieueffecten, is het feit dat men vaak probeert effecten van verschillende niveaus met elkaar te vergelijken. Bijvoorbeeld het energieverbruik versus ecologische ontwikkelingen.

Binnen POSW is gekozen voor het gebruiken van de internationaal erkende Life Cycle Analysis [23] voor de beoordeling van milieueffecten van waterbodemingrepen. Deze LCA methode rekent milieuaspecten op het niveau van milieu*gebruik* om naar potentiële gevolgen op het niveau van milieu*kwaliteit*. Specifiek voor de waterbodemproblematiek zijn een aantal aspecten (waterverbruik, ruimtebeslag en hinder) aan de standaard LCA methode toegevoegd, waardoor deze tot LCA-plus is geworden [24].
Door monitoring gedurende de looptijd van POSW is een redelijk beeld van het milieu*gebruik* van de verschillende technieken verkregen. Deze zogenaamde 'milieuprofielen' kunnen worden gebruikt bij keuzen tussen technieken, bij verdere techniekoptimalisatie en als input voor de LCA analyse [22]. In dit rapport wordt

het milieu*gebruik* en het milieuresultaat van de biologische technieken gepresenteerd.

3.3.3 Milieuaspecten van biologische technieken

Ten einde de milieuprestatie van verschillende biologische technieken te vergelijken, is een beoordeling op het niveau van Milieugebruik uitgevoerd. Omdat het doel was om de biologische technieken onderling te vergelijken, zijn baggeren en transport niet meegenomen.

Alvorens in te gaan op de resultaten wordt eerst een overzicht gegeven van de in ogenschouw genomen Milieugebruiksaspecten en de uitgangspunten bij de berekeningen. In het Basisrapport Biologisch Reinigen [1] wordt de evaluatie in meer detail weergegeven.

Milieuaspecten
De Milieu-aspecten (tabel 8) zijn onderverdeeld in aspecten die positief zijn (Gewenst Resultaat) en aspecten die negatief zijn (Milieugebruik).

Het gewenste *resultaat* bestaat uit het reduceren van de risico's van de verontreinigde specie (gehalten en mobiliteit van verontreinigende stoffen) en uit het reduceren van benodigd depotvolume en gebruik aan primaire grondstoffen (productie van toepasbaar materiaal). Het is mogelijk dat een behandeling leidt tot een sterke reductie van de risico's, terwijl toch de normen voor toepassing volgens de regelgeving nog niet gehaald zijn.
Het milieu*gebruik* is opgesplitst in tijdelijk ruimtebeslag, energieverbruik, grondstoffenverbruik, het ontstaan van emissies en hinder.

Tabel 8: Milieuaspecten gebruikt bij de beoordeling van biologische technieken.

Aspecten		Eenheid	Opmerkingen
GEWENST RESULTAAT			
1: Reductie gehalten	olie, PAK, (metalen)	mg/kg ds → % beter	
2: Reductie mobiliteit	olie, PAK, metalen	mg/kg ds → % beter	
3: Reductie ecotoxiciteit	specie	% verbetering	
4: Reductie vrachten	olie, PAKtotaalvracht	kilo's verwijderd	
5: Productie toepasbaar materiaal	hoeveelheid droge stof	% van de ds	effect korrelgrootte en % o.s. niet berekend
6: Productie toepasbaar materiaal	kwaliteit producten	kwaliteitsfactor (arbitrair)	streefwaarde = 100%, cat. 1= 66%, cat. 2 =33%
MILIEUGEBRUIK			
1: Tijdelijk Ruimtebeslag		Ha/50.000 tds jaar	totaal, voor installaties met capaciteit van 50.000 tds/jaar
2: Energieverbruik		kW/tds (50.000 tds/jr)	per tds, voor installaties met capaciteit van 50.000 tds/jaar
3: Grondstoffenverbruik	water	kubieke meter per tds	
	chemicaliën	*t/tds*	*niet onderscheidend bij biol. technieken*
	toeslagstoffen	*t/tds*	*niet onderscheidend bij biol. technieken*
	materialen		*te weinig informatie*
4: Emissies	*lucht, water, bodem*		*gering en niet onderscheidend bij biol. techn.*
5: Hinder	*geluid, stank, veiligheid*		*niet onderrscheidend bij biol. technieken*

Uitgangspunten bij berekeningen

Alle milieuaspecten zijn uitgerekend voor de verwerking van één ton droge stof in de installaties. Dit betekent dat voor behandeling van alleen de fijne fracties, rekening gehouden moet worden met de verwerking van de totale specie.

Uitzondering vormt het ruimtebeslag wat is uitgedrukt in het oppervlak benodigd voor de verwerking van 50.000 tds per jaar. Bij energieverbruik is deze capaciteit ook als uitgangspunt genomen, waarna de energievraag door 50.000 tds is gedeeld. Bij energieverbruik is dus het verbruik per ton droge stof aangegeven.

Voor berekening van energieverbruik en ruimtebeslag zijn de zelfde uitgangspunten als voor de kostenberekeningen (paragraaf 3.2) aangehouden. Dit geldt voor zowel de benodigde (verblijf)tijd, als de maximaal hanteerbare droge stof en de dimensioneringen van de installaties (hoogte/breedte/lengte).

Waar mogelijk zijn de aspecten uitgedrukt als percentage verbetering ten opzichte van het storten van de specie in depots (de nul-optie). Uitzondering vormt de vrachtverwijdering, welke is uitgedrukt in kilo's per ton droge stof.

Bij de beoordeling van de productkwaliteit is een grofstoffelijke indeling aangehouden (score: streefwaarde = 100%, categorie 1 bouwstof = 66%, categorie 2 bouwstof = 33%).

Voor alle biologische technieken is aangenomen dat een volgens het Bsb toepasbare kwaliteit wordt behaald. Dit zal niet voor alle specie-soorten het geval zijn. Het resultaat dient op voorhand in het laboratorium voorspeld te worden. Een eventuele toekomstige aanpassing van de norm van minerale olie, dan wel de chemische analyse methode voor minerale olie, zal de haalbaarheid van een toepasbare kwaliteit vergroten.

Bij technieken waar geen uitloogtesten en bio-assays zijn uitgevoerd, is aangenomen dat de verbetering gelijk was aan de gemiddelde verbetering van de wel uitgevoerde testen.

De emissies (naar water, bodem, lucht) zijn in de diverse projecten gemeten en niet noemenswaardig gebleken. Ook de aspecten onder hinder zijn niet onderscheidend en niet meegenomen in de beoordeling.

Twee doorsneden in de vergelijking

De milieu-effecten van de technieken worden primair beïnvloed door de techniek zelf. Anderzijds spelen eigenschappen van de specie een rol. Bij sterk gebonden verontreinigingen zal bijvoorbeeld de benodigde verblijftijd (en dus het ruimtebeslag) veel groter zijn dan bij goed beschikbare verontreinigingen. Daarom zijn twee verschillende doorsneden in de beoordeling gemaakt:

1. Het effect van de technieksoort (diverse technieken met één specie: Petroleumhavenspecie);
2. Het effect van de speciesoort (diverse species met één techniek: Intensieve Landfarming).

1. Milieuprestaties van verschillende biologische technieken

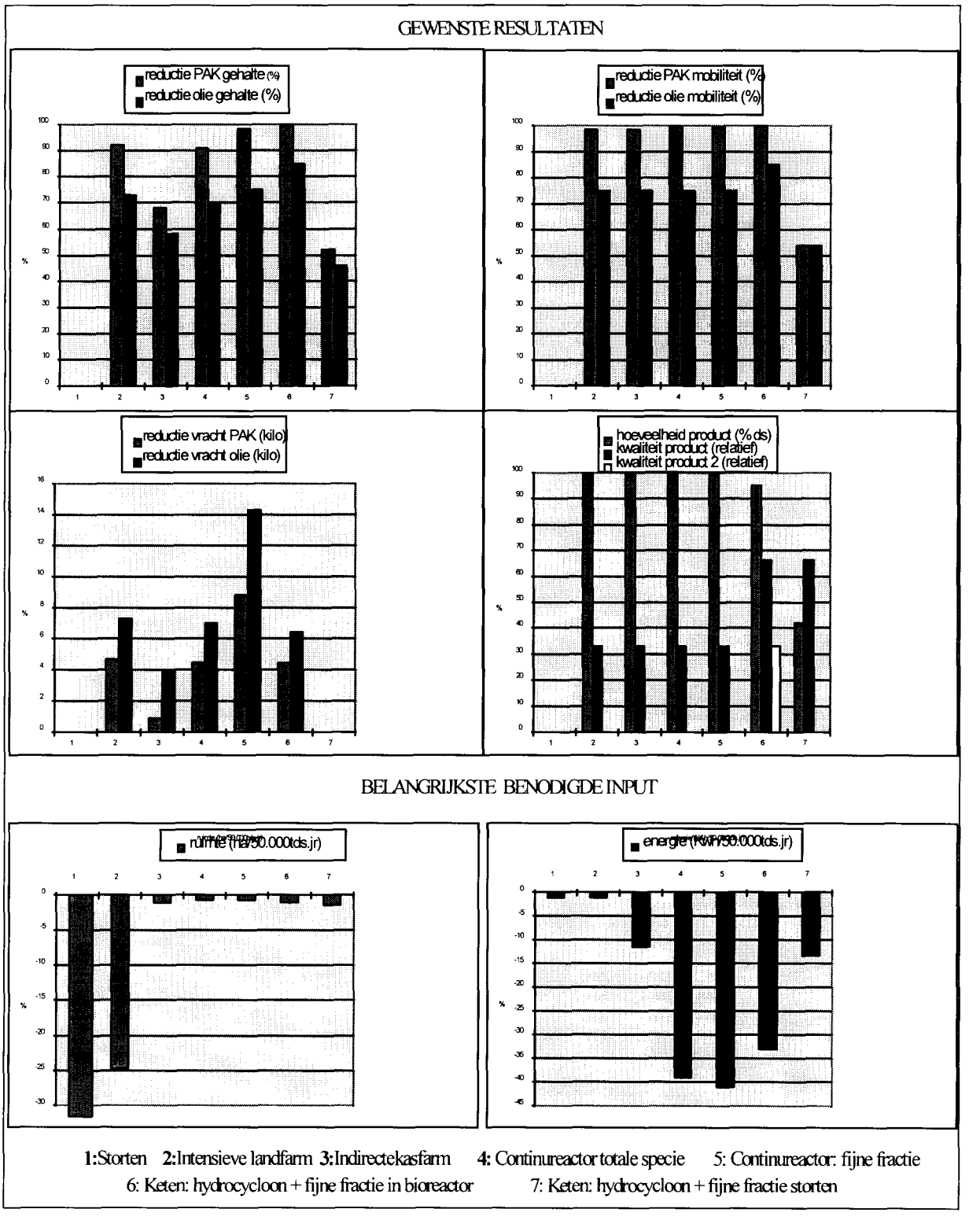
Om het effect van de techniekeigenschappen zichtbaar te maken, zijn alle technieken tenminste met één dezelfde specie beproefd. Dit was de sterk verontreinigde Petroleumhavenspecie. Bij de milieubeoordeling zijn de volgende technieken en ketens vergeleken:

Tabel 9: Effect technieksoort: overzicht van beoordeelde ketens en technieken.

techniek	totale specie	fijne fractie	grove fractie
1: storten	storten		
2: intensieve landfarming	landfarmen		
3: indirecte kasfarming	landfarmen --> kasfarmen		
4: continue slurrie reactor	continu reactor		
5: continue slurrie reactor		continu reactor	(niet beoordeeld)
6: keten a:	hydrocyclonage	continu reactor	floteren
7: keten b:	hydrocyclonage	storten	floteren

De resultaten van de berekeningen zijn gepresenteerd in bijlage 2 en figuur 22. In de tabel worden de detailgegevens en marges voor verblijftijden en daar aan gekoppeld energieverbruik, aangegeven. In de figuur zijn de gemiddelde waarden gebruikt en worden alleen de meest relevante milieuaspecten weergegeven.

Figuur 22: Belangrijkste milieueffecten bij vergelijking biologische technieken.



Het *resultaat* bij storten is nul: er wordt geen winst geboekt op depotruimte, er worden geen secundaire bouwstoffen geproduceerd en er is geen reductie van de gehalten of mobiliteit van verontreinigende stoffen.

De biologische behandeling leidt tot (aannemende dat een Bsb toepasbare kwaliteit behaald wordt) 100% productie van toepasbare droge stof. Het materiaal wordt echter maximaal, slechts tot een categorie 2 kwaliteit (arbitrair gescoord op 33%) gereinigd. In de ketens met hydrocyclonage wordt de zandfractie tot een categorie 1 kwaliteit (arbitrair gescoord op 66%) en de slibfractie ofwel biologisch gereinigd, ofwel gestort. De kwaliteit van de producten kan een rol spelen bij de afzetmogelijkheden. Dit kan van belang zijn bij de afweging om de specie ofwel ongescheiden biologisch te verwerken, ofwel een keten met fractiescheiding uit te voeren. In het eerste geval wordt méér droge stof toepasbaar gemaakt, maar is de kwaliteit minder goed.

De reductie van de risico's is voor de meeste technieken met Petroleumhavenspecie vergelijkbaar. Alle technieken verwijderen een groot deel van de vracht aan minerale olie en PAK. Bij Indirecte Kasfarming is alleen de vrachtverwijdering ná de Intensieve Landfarming weergegeven. Deze is geringer omdat reeds een groot deel van de vracht verwijderd was. De vrachtverwijdering is bij behandeling van 1 ton droge stof aan fijne fractie in bioreactoren veel groter dan bij behandeling van 1 ton droge stof ongescheiden specie, omdat in de fijne fractie meer verontreiniging aanwezig is. Wanneer de behandeling van 1 ton droge stof specie in een integrale keten wordt beschouwd (laatste twee kolommen in de grafieken) wordt de vrachtverwijdering lager en zelfs nul bij storten van de fijne fractie. De verontreiniging blijft aanwezig in de fijne fractie (depot) en in het flotatieresidu.

Het belangrijkste milieu*gebruik* waar voor het behalen van de resultaten een beroep op wordt gedaan, bestaat uit het ruimtebeslag en het energieverbruik tijdens de verwerking. Deze twee parameters zijn afhankelijk van de benodigde verblijftijden. Opvallend is dat landfarming een relatief groot ruimtebeslag en klein energieverbruik heeft, terwijl dat bij reactortechnieken andersom is. Bij landfarming is het ruimtebeslag een factor 100 hoger dan bij reactoren en een factor 50 hoger dan voor hydrocyclonage met nabehandelingen. Het energieverbruik van landfarming is juist laag, in vergelijking met de andere technieken. Dit scheelt ongeveer een factor 55. Een ander verschil betreft het waterverbruik (zie bijlage 2). Bij landfarming is géén water nodig, en bij reactoren en hydrocyclonage een beperkte hoeveelheid. Afhankelijk van de (milieu)waarde die aan de aspecten ruimtebeslag, energie- en waterverbruik wordt gegeven, kan de beoordeling van de technieken variëren. Een zekere locatie-afhankelijkheid (ruimte, energie-leverancier) zal hierbij een rol kunnen spelen.

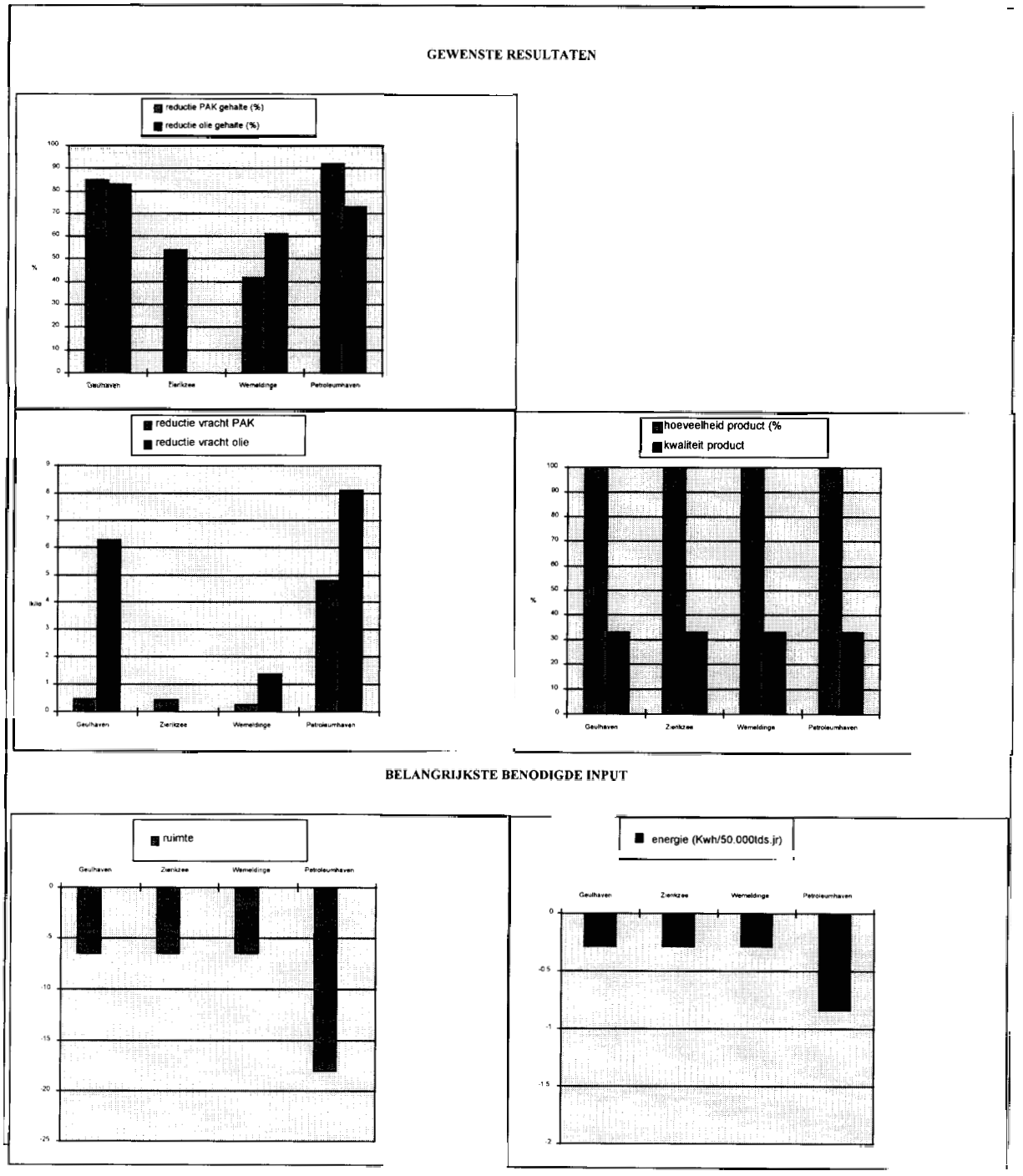
2. Milieuprestaties van landfarming bij verwerking van verschillende species

Naast de performance van de technieken, zijn ook de eigenschappen van de species van invloed op de milieuprestaties van de behandeling. De verschijningsvorm van de verontreinigende stoffen is bepalend voor de biobeschikbaarheid van de stoffen en dus voor de benodigde verblijftijden. Om het effect van de specie-eigenschappen duidelijk te maken, is een vergelijking gemaakt van de milieuprestaties van één techniek (intensieve landfarming) bij de behandeling van vier typen specie (Geulhaven, Zierikzee, Wemeldinge en Petroleumhaven).

In bijlage 3 zijn de resultaten cijfermatig weergegeven, figuur 23 worden de resultaten grafisch gepresenteerd. Gegevens omtrent uitloging waren onvoldoende voorhanden, maar worden niet verwacht onderscheidend te zijn. Bij de berekeningen is uitgegaan van de landfarmprestaties met deze vier species (figuur 11, par. 2.3). Aangenomen is dat de grenswaarde uit het Bsb bereikt zal worden, voor Petroleumhavenspecie binnen 26 maanden en voor de overige species binnen 9 maanden.
Landfarming leidt bij alle vier de species tot een categorie 2 kwaliteit voor 100% van de droge stof. Wel zijn verschillen aanwezig in de reductie van de verwijderde vrachten en van de ecotoxiciteit. De vrachtverwijdering is bij Wemeldinge- en Zierikzeespecie klein en bij Geulhavenspecie en zeker bij Petroleumhavenspecie zeer groot.

Het milieu*gebruik* dat nodig is voor het bereiken van dit resultaat is alleen bij Petroleumhavenspecie groter. Dit is wordt veroorzaakt door de langere benodigde verblijftijd (26 maanden), wat zowel op het energieverbruik als op het ruimtebeslag doorwerkt. Daar staat tegenover dat de milieuwinst voor Petroleumhaven groter is. De milieubalans blijft positief.

Figuur 23: Grafische weergave van de milieu-aspecten van landfarming



3.3.4 Conclusies en aanbevelingen

- Milieueffecten zijn divers van aard, liggen op meerdere niveaus in de oorzaak-gevolg keten en zijn niet alle te kwantificeren.
- De LCA-methode biedt een goed handvat voor het beoordelen van de milieueffecten van waterbodemingrepen. De LCA-methode is door POSW voor dit doel aangepast tot 'LCA-plus', waarin de specifieke aspecten zijn toegevoegd: Blijvend Ruimtebeslag (voor deponie), Tijdelijk Ruimtebeslag (voor verwerking), Grondwaterverbruik (verwerking) en Verstoring (geluid, stank, hinder, volksgezondheid).
- De invoer van de LCA-methode bestaat uit milieu*gebruik*sgegevens van technieken. Hiervoor zijn profielen opgesteld [22] aan de hand van praktijkgegevens. Beoordeling van milieueffecten kan (behalve met de LCA-plus methode) ook op het niveau van het milieu*gebruik* plaatsvinden.
- De verschillende milieu-effecten zijn dusdanig verschillend van aard, dat ze moeilijk onderling vergelijkbaar zijn. Het toepassen van weegfactoren om het belang van de verschillende aspecten aan te geven, is subjectief, kan gevalsspecifiek zijn en is bovendien aan verandering in de loop der tijd onderhevig. Daarnaast spelen ook locale aspecten (beschikbaarheid van ruimte, aanwezigheid duurzame energiebronnen) een rol.
- Het milieu*resultaat* van biologische technieken bestaat uit een sterke reductie van vrachten en gehalten aan organische stoffen bereikt en een zeer sterke reductie van de mobiliteit van deze stoffen. Hierdoor kan in species waarin deze stoffen de kwaliteit bepalen, een toepasbaar product (categorie 2 volgens Bsb) gemaakt worden. Zware metalen kunnen door het aërobe milieu mobieler worden.
- Het belangrijkste milieu*gebruik* van biologische technieken ligt in het energieverbruik en het ruimtebeslag. Bij landfarming is het ruimtebeslag zeer groot en het energieverbruik zeer laag. Bij reactoren is dit precies andersom. Milieuprestaties worden bovendien beïnvloed door de eigenschappen van de specie (biobeschikbaarheid). De afweging tussen landfarming of bioreactoren, in het kader van de milieuprestaties, zal afhankelijk zijn van weegfactoren en locale omstandigheden.
- In vergelijking met chemische of thermische verwerkingstechnieken, is het energieverbruik voor biologische technieken relatief laag, voor landfarming is het ruimtebeslag relatief hoog [22].
- Bepaling van uitlooggedrag en ecotoxiciteit dient standaard uitgevoerd te worden bij (onderzoek naar) verwerkingstechnieken van baggerspecie. De relaties tussen de daadwerkelijke risico's van baggerspecie (uitloging, ecotoxiciteit) en de regelgeving voor hergebruik en toepassing (ENW, Bouwstoffenbesluit), dienen verder in overeenstemming te worden gebracht.
- Het kwantificeren van het milieu*gebruik* van verschillende technieken is momenteel redelijk goed uitvoerbaar en kan bij de keuze tussen technieken, naast de kosten, een criterium zijn.

4. SAMENVATTING EN EVALUATIE

4.1 Technieken

Biologische verwerkingstechnieken kunnen gegroepeerd worden in vier technologische concepten: reiniging in situ, in depot, in landfarms en in reactoren.

Reiniging in situ is gericht op biologische reiniging van slib *ter plekke* (minerale olie, PAK) door toediening van preparaten. Het concept zoals beproefd wordt momenteel door POSW als ondoelmatig beschouwd. Knelpunt vormt het bereiken van voldoende zuurstofrijke condities in de waterbodem.

Reiniging in depot, gericht op de biologische afbraak van organische gechloreerde verbindingen, biedt perspectief. Aanvullend onderzoek is nog nodig naar stofbalansen (uit afbraak verwachte afbraakproducten) en verblijftijden.

Reiniging in landfarms en in reactoren (ex situ afbraak van minerale olie, PAK) hebben zich in praktijk reeds bewezen. Technieken binnen deze concepten zijn klaar voor ruimere toepassing, waarbij aandacht voor onderstaande aspecten van belang is.

4.2 Verblijftijden en productkwaliteit

Biologische verwerking wordt gekenmerkt door relatief lange behandelingstijden en de aanwezigheid van restconcentraties in de behandelde specie (verontreinigende stoffen die sterk gebonden voorkomen).

Het verloop en het eindresultaat van de reiniging verschillen per specie, maar zijn voorspelbaar (-binnen zekere marge-) met behulp van vooraf uitgevoerde laboratoriumtesten (biodegradatietesten of desorptietesten). Met name korte verblijftijden zijn kostentechnisch interessant.

De productkwaliteit zal de beslissing over toepassing nog sterker beïnvloeden. Met biologische verwerking wordt een bouwstoffenkwaliteit (volgens het Bouwstoffenbesluit) nagestreefd.

Voorwaarde is dat andere, niet af te breken stoffen (zware metalen) de toepassing als bouwstof in werken niet op voorhand in de weg staan. PAK (10 VROM) zijn met biologische technieken goed tot onder de Bsb-grenswaarde te verwijderen; het behalen van de norm voor minerale olie is voor veel species (nog) een probleem.

Los van de uitkomsten van de evaluatie van deze norm, zou het interessant zijn om de werkelijke risico's van de resterende (sterk gebonden) olie in de beoordeling mee te wegen. Omdat een betrouwbare bepaalbaarheidsgrens voor minerale olie rond de Bsb-grenswaarde ligt, verdienen mogelijke storingen in de analyse aandacht.

4.3 Kosten en milieu-aspecten

De kosten (variërend tussen fl. 35 tot fl. 82 per ton droge stof) lijken toepassing niet in de weg te staan.
Reactortechnieken vragen -vergeleken met landfarming (al dan niet met een compost voorziening aan de onderzijde)- een grotere investering; een aspect dat eventueel een belemmering zou kunnen vormen.

Ten aanzien van milieu-aspecten geldt dat bij landfarmtechnieken het ruimtebeslag groot, en het energieverbruik laag is. Bij reactortechnieken is dit andersom.

Het belang van deze twee milieu-aspecten kunnen per geval variëren (lokaal beschikbare ruimte, mogelijkheid om energie uit duurzame bronnen te gebruiken).

4.4 Techniekkeuze

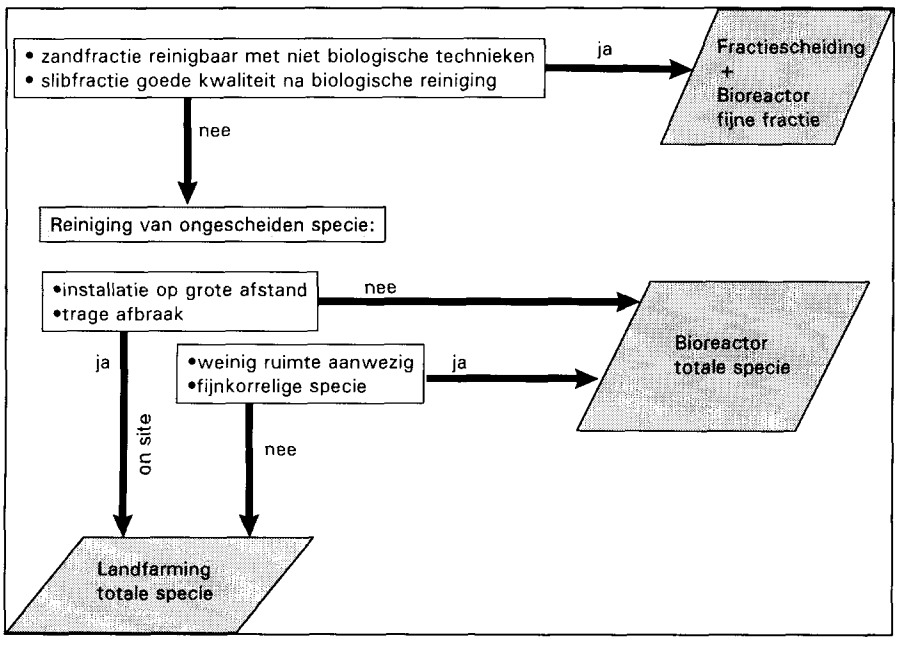
Specie is in potentie geschikt voor biologische reiniging als organische verontreinigende stoffen de kwaliteitsklasse van de specie bepalen en (zie boven) de zware metalen-gehalten laag zijn. Het vaststellen van de gehalten van deze stoffen is de eerste stap in een techniekkeuze.

In een tweede stap wordt met laboratoriumonderzoek gekeken naar de potentiële snelheid en eindresultaat van de afbraak. Bij een positief oordeel over de toepassing van biologische reiniging is er keuze uit:

1) Bioreactoren voor behandeling van de fijne fractie:
   - indien de vooraf af te scheiden zandfractie schoon is of goed reinigbaar is met niet-biologische technieken;
   - indien de productkwaliteit van de biologisch behandelde fijne fractie voldoet aan de normen van het Bouwstoffenbesluit (aandachtspunten: metalen en hogere PAK).
2) Landfarming voor behandeling van totale specie:
   - indien het specietype goede structuurvorming mogelijk maakt;
   - indien voldoende ruimte beschikbaar is, of gecombineerd ruimtegebruik (bosbouw, energieteelt) mogelijk is.
3) Bioreactoren voor behandeling van totale specie:
   - indien de ruimte voor de aanleg van een landfarm niet of beperkt beschikbaar is;
   - indien weinig tijd beschikbaar is.

De optimale variant zal van geval tot geval kunnen verschillen en wordt ook bepaald door procedurele aspecten (benodigde of aanwezige vergunningen). Ook van belang zijn bijvoorbeeld ook factoren als de afstand tot een verwerkingsinstallatie en de schaalgrootte van de sanering. Figuur 24 geeft de keuzemogelijkheden nog maals visueel weer.

Figuur 24: Keuzen tussen biologische verwerkingstechnieken



4.5 Conclusies

- Biologische technieken vormen een goede optie voor de aanpak van een substantieel deel van de Nederlandse waterbodems. De technologie is zo ver ontwikkeld dat tegen acceptabele kosten en met geringe milieu-effecten verwerking mogelijk is. Voorspelbaarheid van verwerkingstijden en productkwaliteit vormen evenmin een obstakel. Belangrijkste knelpunt voor een deel van het aanbod zal zijn het behalen van de norm voor minerale olie.
- Een negatieve beoordeling op het minerale oliegehalte zal in een deel van de gevallen het gevolg zijn van storingen die in de analyse zijn opgetreden. Optimalisatie van de analyse is daarom een aandachtspunt, tezamen met het volgende:
    - Voor de gevallen waarin restconcentraties hoog zijn moeten mogelijkheden tot verder reinigingen onderzocht worden, bijvoorbeeld de inzetbaarheid van schimmels.
    - Het langdurig ruimtebeslag bij vergaande reiniging in extensieve landfarm vraagt om een combinatie met een andere, gelijktijdige bestemming/benutting van de daarvoor gebruikte terreinen.
    - Waar metalen-gehalten zorgen voor een niet-toepasbaar product na reiniging, is er wellicht een mogelijkheid om door specifieke beplanting in landfarms simultaan metalen te verwijderen.
    - Omdat biologische reiniging start met een afbraak van met name de *biologisch goed beschikbare* fractie van de verontreinigende stoffen, verdient het ten zeerste aanbeveling om -naast absolute (rest)concentraties- ook de daadwerkelijke risico's van restconcentraties in beschouwing te nemen.

5. REFERENTIES

1. 'Biologische technieken voor reiniging van baggerspecie. Basisrapport'. *Ferdinandy*, POSW-II rapport, deel 20, juli 1998.
2. 'Haalbaarheidsstudie Grootschalige Verwerking Baggerspecie. Eindrapport Fase 2: Scenario's voor verwerking baggerspecie', *KPMG, Grontmij, BOB*, POSW-II rapport, deel 13, maart 1997.
3. 'Eindrapport Programma Ontwikkeling Saneringsprocessen Waterbodems'. POSW-II, april 1997.
4. 'Derde Nota Waterhuishouding'. TK vergaderjaar 1989-1990, nr 21250. Staatsuitgeverij Den Haag, 1990.
5. 'Evaluatienota Water'. Regeringsbeslissing. Aanvullende beleidsmaatregelen en financiering 1994-19998. TK 1993-1994, 21250 nr. 27-28.
6. 'Biotechnologische uitloging van zware metalen uit de slibfractie van baggerspecie'. *AQUARIN*. POSW-I, deel 16, december 1991.
7. 'Onderzoek naar producten voor in situ biologische reiniging van waterbodems'. *Grontmij, Bioclear Milieubiotechnologie, Haskoning*, POSW-II, deel 1, april 1994.
8. RIZA Wvo advies en protocol aangaande in situ biologische reiniging van waterbodems. RIZA brief met kenmerk EMCW 6395, 22 juli 1994.
9. 'Microbial dechlorination of hexachlorobenzene in a sedimentation area of the Rhine River'. *Beurskens, J.E.M., Dekker C.G.C., Jonkhof J., Pompstra L.*, Biogeochem. 19: 61-81, 1993.
10. 'Reiniging in depot'. *Bioclear Milieubiotechnologie*, POSW-II, deel 36, augustus 1998.
11. 'Landfarming van baggerspecie: laboratorium- en praktijkonderzoek'. *DHV*, POSW-II, deel 2, maart 1995.
12. 'Mogelijkheden van extensieve landfarming voor biologische reiniging van baggerspecie'. DLO-Staring Centrum, POSW-II, deel 33, november 1997.
13. 'Intensieve landfarming van verontreinigde baggerspecie: ontwatering en afbraak'. DLO-Staring Centrum. POSW-II, deel 32, november 1997.
14. 'Biologische reiniging van Petroleumhavenspecie middels kasfarming'. POSW, *De Vries en van de Wiel Milieutechniek*. POSW intern rapport, oktober 1995.
15. 'Onderweg naar het Bouwstoffenbesluit'. *RIVM, RIZA*, CUR publikatie 95-1, januari 1995.
16. 'Toepassing en opschaling van beluchtingsbassin'. *TNO*, POSW-II, interne rapportage, maart 1995.
17. 'Toepassing van het Slurry Decontamination Process voor de reiniging van vervuilde baggerspecie uit de Petroleumhaven Amsterdam'. *Bird Engineering*, POSW-II, interne rapportage, april 1995.
18. 'Rapidly desorbing fractions of PAHs in contaminated sediments as a predictor of the extens of bioremediation'. *Cornelissen G., Rigterink H., Ferdinandy M.M.A., Noort P.C.M. van.* Environmental Science and Technology, Vol. 32, no. 7, 966-970.
19. 'Effecten op het milieu van direct op de kant brengen van bagger, verontreinigd met PAK, op Goeree-Overflakkee'. DLO-Staring Centrum (Van den Toorn A., Harmsen J., van Dijk-Hooyer O.M., 1997 (in voorbereiding)
20. 'Biodegradatie van organische microverontreinigingen met behulp van schimmeltechnologie'DLO-Staring Centrum, Van den Toorn A., Gerris J.P. G., van Dijk-Hooyer O.M., Harmsen J., Wieggers H.J.J., 1997 (in voorbereiding).

21. 'Kostenstudie biologische reiniging van baggerspecie'. *Consulting bureau Scarabee.* POSW-II, interne rapportage, januari 1997.

22. 'Milieubeoordeling van verwerkinsgketens voor verontreinigde baggerspecie. Eindrapport'. TNO/RIZA. POSW-II rapport, deel 22, augustus 1998.

23. 'Milieugerichte levenscyclus analyses van producten, Achtergronden en Handleiding'. NOH-publicatie 9253 en 9254, oktober 1992

24. 'Beoordeling van milieueffecten ten behoeve van Haalbaarheidsstudie Grootschalige Verwerking van Baggerspecie; deelstudie D inclusief addendum'. TNO, POSW-II, interne rapportage, november 1996.

6. BIJLAGEN

6.1 Overzicht van POSW projecten biologische reiniging

Tabel 1: Overzicht van binnen POSW uitgevoerde projecten naar biologische reinigingstechnieken.
KW =Kameriksche wetering, AK =Apeldoorns kanaal, Geu =Geulhaven, Zie =Zierikzee, Pet = Petroleumhaven, Wem = Wemeldinge. Pilot = pilotschaal: 3-8 m3.
StarC = Staring Centrum, TNO = TNO-IMET, RDIJ = RWS IJselmeergebied, RZee = RWS Zeeland, RNN = RWS Noord Nederland, DeVW = De Vries en van de Wiel

Uitvoerings-vorm	Concept	Specie	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	uitvoerder
in depot	Stimulering HCB	Delfzijl			lab-	onder-	zoek				RIZA
		Delfzijl					literat uur	monit oring	in	depot	Bioclear/RNN
in situ	Preparaten	KW en AK				lab en	veld				Bioclear/Grontmij
								mon situ			Grontmij
									lab en veld		Bioclear/RDIJ/RIZA
in landfarm	Intensief	Geu en Zie	lab	veld	veld	veld	veld				DHV/Rzee
	Intrinsiek	Geu en Zie						veld	veld	veld	StaC/Rzee
	Intensief	Pet en Wem						veld	veld	veld	StarC/Rzee
	Kasfarm	Pet en Wem							pilot		StarC/Heijmans
	Kasfarm	Pet						pilot			DeVW/POSW
	Algemeen						literat uur				Iwaco
in reactoren	Bioreactor	Geu en Zie	lab	lab							TNO
	Beluchtingsbassin	Geu en Zie	lab	pilot	pilot						TNO
	Selectie specie						lab				TNO
	Beluchtingsbassin	Pet						pilot	pilot		TNO
	Slurry Dec Proc	Pet						pilot	pilot		Bird Engineering
	Demonstratie								selectie	demo	Bird Engineering Heidemij Realisatie Silt

6.2 Milieu-aspecten bij reiniging van Petroleumhavenspecie met diverse biologische technieken

		Ongescheiden specie					Fijne Fractie			
		storten	intensieve landfarm	directe kasfarm	(int. landfarm) indir. kasfarm	continue reactor	batch reactor	continu reactor	fijn: continu reactor zand: floteren	fijn: storten zand: floteren
Reductie gehalten (%)	PAK	0	92%	75%	68%	91%	98%	98%	99,9%	52%
	olie	0	73%	47%	58%	70%	75%	75%	85,0%	46%
Reductie uitloging (%)	PAK	0	98,5%*	96%	98,5% *	99,8%	99,5%	99,5%	99,9%	54%
	olie	0	75, 0%*	75%*	75% *	75% *	75% *	75% *	85,0%	54%
	metalen	0	-150,0%*	-150%*	-150% *	20%	-450% *	-450% *	50,0%	54%
Reductie ecotoxiciteit (%)	gemiddelde score	0	56%	56%	56% *	70%	47%*	47%*	64%	20%
Reductie vracht (kilo/tds)	PAK	0	0,47	0,375	0,085	0,45	0,88	0,88	0,44	0
	olie	0	7,3	4,6	4,0	7,0	14,3	14,3	6,43	0
Reductie depotvolume	(%)	0%	100%	0%	100%	100%	100%	100%	95%	42%
	(volume benodigd:)	1,7 m3	0 m3	0,9 m3	0m3	0 m3	0 m3	0m3	0,085 m3	0,743 m3
Kwaliteit producten	(score)	0	33%	0	33%	33%	33%	33%	66% en 33%	66 % en 0%
	(kwaliteit:)	BAGA	cat. 2	K 4	cat. 2	cat. 2	cat. 2	cat. 2	slib-zand-flotatieres. cat. 2-1-BAGA	slib-zand-flotatieres. BAGA-catl-BAGA
	(% van de ds:)	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	45%-54%-1%	45%- 54%- 1%
Ruimtebeslag										
Verblijftijd	(min - max)	eeuwig	18-30 mnd	6-9 mnd	1-3 mnd	8-12 dag	14-28 dag	8-16 dag	8-16 dag	8-16 dag
Volume	(m3/tds)	1.7	1,7	1,7	1.27	2.5	4.0	4.0		
Oppervlakte	(m2/tds)		1,7	1,7	1,27	0.625	1.0	1.0		
Opp. (ha, 50.000 tds/jr)	(min-max)		19.8.-29.7	4.4-5.5	0.67-1.63	0.17-0.26	0.35-0.63	0.23-0.4	1.17-1.2	1.5
Energieverbruik	(kWh/tds) (min-max)		0,6-1,05	34,8-52,2	5,8-17,4	30-48	28-56	30-52	28,3-39,3	13,3
Waterverbruik	(m3/tds)	0	0	0	0	0.85 m3	1.87 m3	0.85 m3	3.9 m3	3.5 m3

6.3 Milieu-aspecten bij landfarming van 4 soorten species

	Geulhaven	Zierikzee	Wemeldinge	Petroleumhaven
Gehalte				
PAK	85%	54%	42%	92%
Olie	83%	nb	61%	73%
Vracht				
PAK	0.045 kilo	0.044 kilo	0.025 kilo	0.48 kilo
Olie	6.720 kilo	nb	1.370 kilo	8.11 kilo
Tijd	9 maanden	9 maanden	9 maanden	26 maanden
Ruimtebeslag	65.000 m2	65.000 m2	180.000 m2	180.000 m2
Energie	0.29 kWh	0.29 kWh	0.84 kWh	0.84 kWh
Depotruimte	100%	100%	0% 100%	100%
Prim grondstoffen	33%	33%	33%	33%