

**IN-SITU WATERBODEMSANERING:
VOORSTELBAAR EN HAALBAAR?**

J.H.J. van der Gun en J. Joziase

RAPPORTEN PROGRAMMA GEÏNTEGREERD BODEMONDERZOEK

DEEL 23

Gegevens: In-situ waterbodemsanering: voorstelbaar en haalbaar? / J.H.J. van der Gun en J. Joziasse - Wageningen: Programmabureau Geïntegreerd Bodemonderzoek (Rapporten Programma Geïntegreerd Bodemonderzoek; deel 23) - 44 p., 2 bijl., E. summ. - ISBN 90-73270-38-3.

Trefwoorden: bodemsanering, waterbodemsanering.

Verantwoording:

In-situ bodemsanering staat op dit ogenblik sterk in de belangstelling als gevolg van de recente beleidsontwikkelingen op dit gebied en de nieuwe mogelijkheden, die zich op dit moment voordoen voor de aanpak van landbodems. In deze studie zijn de mogelijkheden voor de in-situ aanpak van verontreinigde waterbodems onderzocht. Daarbij is vooral gekeken naar mogelijkheden voor waterbodems binnen het natte profiel. Er wordt een duidelijk overzicht geboden van denkbare aanpakken met een kwalitatieve beoordeling van kosteneffectiviteit en effecten op de omgeving. Gezien de geringe ervaring met deze aanpak van verontreinigde waterbodems bevelen de onderzoekers aan om te komen tot een aantal voorbeeld-projecten, waarin verschillende technieken voor specifieke situaties kunnen worden uitgetoetst.

Het rapport is verkrijgbaar bij het Programmabureau Bodemonderzoek in Wageningen à f 40,-.

Dankwoord:

De leiding van het Programma Geïntegreerd Bodemonderzoek is veel dank verschuldigd aan hen, die tijd en aandacht hebben willen besteden aan het welslagen van deze verkenning door hun deelname aan de interviews. Extra dank is verschuldigd aan prof.dr. W.H. Rulkens (WUR) en dr.ir. K.P. Groen (RIZA/AKWA) voor de begeleiding van het project namens de Programmacommissie Geïntegreerd Bodemonderzoek.

Projectleiding en uitvoering:

BodemBeheer bv Bureau voor Projectmanagement & Milieuadvies: ir. J.H.J. van der Gun;
Postbus 25, 3998 ZR Schalkwijk; telefoon: 030 - 6011986;
TNO Milieu, Energie en Procesinnovatie: dr. J. Joziasse; Postbus 342, 7300 AH
Apeldoorn; telefoon: 055 - 5493493.

©1999. Programma Geïntegreerd Bodemonderzoek; Postbus 37, NL-6700 AA Wageningen;
telefoon: 0317-484170; telefax: 0317-485051; e-mail: OFFICE PGBO@SPBO.BENG.
WAU.NL.

omslag: Ernst van Cleef
druk: Grafisch Service Centrum van Gils B.V., Wageningen

Inhoud

Inhoudsopgave

Samenvatting	i
Summary	iii
1 Inleiding	1
1.1 Aanleiding en achtergronden	1
1.2 Vraagstelling	2
1.3 Doelstelling	2
1.4 Afbakening	2
1.5 Leeswijzer	2
2 Probleembeschrijving en visieontwikkeling	5
2.1 Probleembeschrijving en achtergronden	5
2.2 Ervaringen met in-situ sanering waterbodems	5
2.3 Ontwikkelingen in het waterbodemsaneringsbeleid	6
2.4 Ervaringen met in-situ sanering van landbodems	8
2.5 Ontwikkelingen in het bodemsaneringsbeleid	11
2.6 Een nieuwe denklijn en visies op in-situ sanering waterbodems	11
3 Inventarisatie van opties voor in-situ aanpak waterbodemsanering	13
3.1 Overzicht van mogelijkheden	13
3.2 Stimuleren van microbiologische afbraak	15
3.3 Stimuleren van reductieve dechlorering en verdere afbraak	20
3.4 Stimuleren van biologische afbraak	21
3.5 Stimuleren van biologische concentrering en verwijdering	21
3.6 Mobiliseren van verontreinigende stoffen	22
3.7 Toepassing van chemische omzettingen	22
3.8 Vastleggen van verontreinigende stoffen (sorptie/immobilisatie)	22
3.9 Beperken van advectieve verspreiding naar het oppervlaktewater	23
3.10 Beperken van advectieve verspreiding naar het grondwater	23
3.11 Niet ingrijpen	24
4 Meest relevante opties voor in-situ waterbodemsanering	25
4.1 Stimuleren van microbiologische afbraak	25
4.2 Stimuleren van biologische concentrering en verwijdering	29
4.3 Stimuleren van reductieve dechlorering en verdere afbraak	30
4.4 Vastleggen van verontreinigende stoffen (sorptie/immobilisatie)	30
4.5 Beperken van advectieve verspreiding naar grond- of oppervlaktewater	30
4.6 Niet ingrijpen	31

5	Praktische betekenis van in-situ concepten	32
5.1	“Droge” waterbodems	33
5.2	“Natte” waterbodems	34
5.3	“Geborgen” waterbodems	38
6	Conclusies en aanbevelingen	39
6.1	Conclusies	39
6.2	Aanbevelingen	42
7	Geraadpleegde literatuur	43
	Bijlage 1: Overzicht geïnterviewde personen	45
	Bijlage 2: Aard en omvang waterbodempromblematiek	47
	Tabellen:	
1	Theoretische mogelijkheden in-situ aanpak waterbodemsanering	14
2	Overzicht van methoden en technologieën die relevant zijn voor de in-situ aanpak van verontreinigde waterbodems	26
	Figuren:	
1	Oplossingsinrichtingen waterbodempromblematiek	9
2	Oeverplan Hollandsche IJssel – Witteveen en Bos	35

Samenvatting

De waterlopen in Nederland moeten regelmatig worden uitgebaggerd om nautische of waterhuishoudkundige redenen. De kwaliteit van de Nederlandse waterbodems is echter op veel plaatsen zodanig aangetast, dat sanering noodzakelijk is. De conventionele aanpak is dan het verwijderen van het verontreinigde materiaal uit de waterloop door middel van baggeren. Dit levert jaarlijks een hoeveelheid baggerspecie op naast het materiaal, dat om onderhoudstechnische redenen wordt gebaggerd. In een aantal gevallen moet deze aanpak echter als minder gewenst of niet doelmatig worden beschouwd.

In het verleden is er onderzoek gedaan naar de mogelijkheden van in-situ sanering door het toevoegen van preparaten aan de waterbodem, die als doel hadden de biologische afbraak te bevorderen van aanwezige verontreinigingen en van de organische stof. Door de afbraak van de organische stof zou het volume van het verontreinigde materiaal worden verkleind, zodat het onderhoud (uitbaggeren) zou kunnen worden uitgesteld. Het toevoegen van deze preparaten bleek echter tot teleurstellende resultaten te leiden. Daarmee leek de optie van in-situ sanering van verontreinigde waterbodems als niet haalbaar te moeten worden bestempeld.

In de laatste jaren hebben zich echter voor terrestrische bodems zowel in het beleid, als in de techniekontwikkeling een groot aantal veranderingen voltrokken. Deze hebben ertoe geleid dat er steeds meer wordt gezocht naar in-situ oplossingen. Daarbij is de gedachte verlaten dat een sanering altijd binnen zeer korte tijd moet worden uitgevoerd en altijd moet leiden tot een "multifunctionele" bodem. Er wordt nu veel meer rekening gehouden met de functie die de bodem nu en in de (voorzienbare) toekomst heeft of zal krijgen. Daarbij staat een beoordeling van de humane en ecologische risico's voorop. Tevens wordt er zoveel mogelijk gebruikgemaakt van natuurlijke processen, ofwel het zelfreinigend vermogen van de bodem.

Het doel van deze in opdracht van PGBO (Programma Geïntegreerd Bodemonderzoek) uitgevoerde studie is om na te gaan in hoeverre de visie die is ontwikkeld voor de in-situ aanpak van verontreinigde terrestrische bodems ook voor verontreinigde waterbodems is te gebruiken. Daartoe is de mening gepeild van een aantal deskundigen op het gebied van terrestrische en aquatische bodemsanering. Na evaluatie van de gevoerde gesprekken is in overleg met de opdrachtgever besloten om het onderzoek te beperken tot de waterbodems die zijn gelegen binnen het natte profiel van waterlopen. Aan geborgen baggerspecie en bodems van uiterwaarden wordt derhalve slechts zijdelings aandacht besteed.

De mogelijkheden voor een in-situ aanpak zijn sterk afhankelijk van de lokale situatie (aard en bindingsvorm van de verontreinigende stoffen, omvang van de verontreiniging, functies, afmetingen en stromingssituatie van de waterloop, *etc.*). Dit rapport geeft allereerst op basis van theoretische overwegingen een overzicht van methoden en technieken die bij verschillende situaties in aanmerking komen. Daarbij wordt voor de meest relevante opties een eerste beoordeling van de haalbaarheid gegeven. Tevens bevat

het rapport een aantal voorbeelden van concrete situaties waarbij de beschreven opties zouden kunnen worden toegepast.

De beschreven opties liggen op het vlak van het stimuleren van (microbiologische) afbraak van organische verontreinigende stoffen (inclusief dechlorering), de concentrering van metalen in planten, het vastleggen van metalen of organische verontreinigende stoffen aan diverse materialen (adsorptie, cementering, vitrificatie), en het beperken van advectieve verspreiding naar grond- of oppervlaktewater (bijvoorbeeld door het afdekken van de bodem, of door hydrologische isolatie van een waterloop). Soms kan ook het achterwege laten van een ingreep als de meest wenselijke optie naar voren komen.

Diverse gevallen worden geschetst waarbij een in-situ aanpak wenselijk lijkt. Daarbij gaat het om situaties waarbij een meer conventionele aanpak (veelal baggeren) niet doelmatig is, of tot grote schade aan natuurwaarden zou leiden. Voorwaarde voor een in-situ aanpak is dat bestaande, of met de in-situ aanpak geïntroduceerde nieuwe (korte- of lange-termijn)risico's acceptabel zijn. De mogelijkheden om de snelheid van biologische afbraakprocessen in-situ te verhogen zijn beperkt. Voor kleine watersystemen zijn er wellicht wel mogelijkheden om maatregelen te treffen, waardoor aan de met aërobe processen gepaard gaande zuurstofvraag kan worden voldaan. In sommige gevallen is het denkbaar dat de omstandigheden voor reductieve dechlorering worden geoptimaliseerd. Dit is met name het geval, indien de betreffende waterloop (tijdelijk) van de aangrenzende watersystemen kan worden geïsoleerd. Voor het vastleggen van verontreinigende stoffen door adsorptie kan worden gedacht aan het toepassen van kleischermen, of kleilagen waaraan eventueel toeslagstoffen zijn toegevoegd; specifiek voor metalen kan phytostabilisatie op langere termijn mogelijkheden bieden. De advectieve verspreiding naar grond- en oppervlaktewater kan worden verminderd door middel van afdekken ("capping") van de verontreinigde bodem met een kleilaag, waaraan eventueel ook stoffen (organische stof, of zuurstofleverende verbindingen (ORC's)) kunnen worden toegevoegd om de sorptiecapaciteit te verhogen, dan wel de biologische afbraak te stimuleren.

De haalbaarheid van de geïdentificeerde opties is in zijn algemeenheid moeilijk in te schatten. Steeds zullen de effecten op het aquatische ecosysteem in rekening moeten worden gebracht. In concrete gevallen, waarbij een conventionele aanpak op grote bezwaren stuit, zal een op de heersende omstandigheden toegespitst onderzoek uitsluitend moeten geven over de haalbaarheid van een alternatieve (in-situ) aanpak.

Aanbevolen wordt om als vervolg op deze studie een workshop te organiseren, waarin een aantal deskundigen praktijkgevallen aandragen die zich zouden lenen voor een in-situ aanpak van aanwezige waterbodempluimverontreinigingen. Uit deze praktijkgevallen kunnen vervolgens cases worden geselecteerd, die nader worden uitgewerkt en in een samen te stellen panel van deskundigen worden becommentarieerd. Dit moet resulteren in een heldere probleemanalyse, inzicht in de inspanningen die nodig zijn om tot toepassing in de praktijk te komen en zo mogelijk een concreet onderzoeksprogramma voor nadere uitwerking van de mogelijkheden voor in-situ aanpak.

Summary

The maintenance of waterways in the Netherlands calls for regular dredging actions, both for nautical or water management reasons. Besides, it is observed that the environmental quality of the sediment in many locations is so bad that remediation is necessary. The usual approach comprises the removal of the contaminated material from the waterway by dredging. This produces a large quantity of dredged material in addition to the quantity from maintenance dredging. However, sometimes, this approach has to be considered as less appropriate or even undesirable.

In the past the possibilities of in-situ remediation by addition of mixtures of various substances have been investigated. The addition of these substances to the sediment served two purposes: (1) to stimulate the biodegradation of organic contaminants, and (2) to stimulate the degradation of organic matter (humus). The degradations of the organic matter was supposed to lead to a volume reduction and hence to a possible postponement of maintenance dredging. The results obtained with the addition of these mixtures turned out to be disappointing, mainly because of an oxygen deficit. With this observation the chances for in-situ remediation options seemed to be gone.

However, a number of changes in the approach of terrestrial soil pollution remediation have come about recently, both with respect to policy aspects as to technical developments. These changes have led to a strong stimulation of in-situ remediation options. No longer it is deemed necessary that remediation actions have to be executed within a very short time period and should always result into a "multifunctional" soil. The present or future function of the soil is now more accounted for in selecting the action to be taken. An assessment of human and ecological risks produces the main criteria. At the same time advantage is taken of natural processes (the self-cleaning capacity of the soil).

The aim of this study which has been commissioned by PGBO (The Netherlands Integrated Soil Research Programme) is to investigate the applicability of the vision that has been developed for terrestrial in-situ soil pollution remediation for in-situ sediment remediation. To this end a number of experts in the field of terrestrial and aquatic soil pollution and remediation have been interviewed. After evaluation of the interviews it has been decided to confine the study to sediments within the so-called wet profile of the waterways. This means that only oblique attention has been paid to stored dredged sediments and to soils in river forelands.

The possibilities of in-situ remediation options strongly depend on the local situation (*viz.* type and speciation of contaminants, extent of the pollution, functions, sizes and current conditions of the waterway). First of all, this report lists a number of methods and techniques that can be considered in different situations. For the most relevant options a provisional feasibility judgement is given. In addition to this the report mentions a number of concrete cases where the options described might be applied. These options are in the sphere of stimulating microbiological degradation of organic contaminants (dechlorination included), concentrating metals into vegetation, immobilisation of metals

or organic contaminants (*viz.* adsorption to various materials, binding in cement, vitrification) and reducing the advective dispersion of contaminants towards ground water or surface water (*viz.* by capping the soil, or by hydrological isolation of the waterway). In specific cases refraining from any action can come forward as the best option in connection with risk reduction considerations.

Various situations are outlined in which an in-situ approach looks appropriate. In these cases a conventional remediation method (dredging) is either ineffective, or it leads to serious damage to nature values. A prerequisite for an in-situ approach is that short or long term risks are acceptable. Both existing risks or risks introduced by the remediation action should be considered here. The possibilities for enhancing the rate of biodegradation processes are limited. In the case of small water systems measures may be taken in order to meet the oxygen demand connected with aerobic degradation processes. Sometimes it may be conceivable that the conditions for reductive dechlorination are optimised. This is particularly true for waterway that can be temporarily isolated from the adjoining water system. As to the immobilisation of contaminants by adsorption one can think of applying clay screens, or clay layers (with or without additives). Specifically for metals phytostabilisation may offer perspectives in the long run. The advective dispersion of contaminants towards ground water or surface water can be reduced by capping the polluted soil with a clay layer, with organic matter (humus) or oxygen release compounds (ORC's) as possible additives. The function of these additives is to increase the sorption capacity or to enhance biodegradation processes.

Generally, the feasibility of the options identified is hard to estimate. Again and again the effects of the actions on the aquatic ecosystem will have to be accounted for. In concrete cases where a conventional approach encounters serious difficulties, an investigation dedicated to the prevailing conditions will have to give a decisive judgement on the feasibility of an alternative (in-situ) approach. If certain options appear to offer good perspectives for application in practice a pilot-scale experiment may be planned as a subsequent step.

It is recommended that as follow up of this study a workshop should be organised in which a group of experts furnishes a list of relevant cases for implementation of in-situ remediation actions. Next, a few cases can be selected for further elaboration. Furthermore, an expert panel can be composed to comment on the cases selected, to deliver a clear analysis of the problems, to give insight into the efforts needed to come to application in practice and to set up an investigation programme for further elaboration of the possibilities for in-situ remediation of contaminated sediments.

1. Inleiding

1.1 Aanleiding en achtergronden studie

In Nederland, door zijn situering en lage ligging ten opzichte van de zee ook wel aangeduid met Deltaland, Polderland of Waterland, is een continue en intensieve aandacht vereist voor het in stand houden van een goed functionerend watersysteem. Dit geldt zowel in kwantitatieve als in kwalitatieve zin. Sinds mensenheugenis zijn waterlopen, vaarwegen en havens aangelegd en periodiek uitgebaggerd om ze in stand te houden. Het vrijkomende materiaal benedenstrooms werd vaak in zee verspreid, terwijl meer bovenstrooms een verspreiding op het land of, na ontwatering, als grondstof met diverse toepassingsmogelijkheden vrij algemeen was.

Door de ongecontroleerde belasting van het oppervlaktewater met verontreinigende stoffen is de kwaliteit van de waterbodem op veel plaatsen zodanig aangetast, dat hergebruik van dit materiaal na baggeren niet meer mogelijk is. Men is ertoe overgegaan dit materiaal te storten in (grootschalige) depots, de laatste jaren soms met voorafgaande afscheiding van de (relatief) schone grove fractie.

Daarnaast is de kwaliteit op zeer veel plaatsen zodanig aangetast, dat ook zonder de onderhoudstechnische aanleiding verwijdering noodzakelijk kan zijn. Voor deze laatste situatie komt de fysieke verwijderingsroute (baggeren) steeds meer ter discussie, indien geen andere opties dan storten van het vrijkomende materiaal beschikbaar zijn.

Binnen het Programma Ontwikkeling Saneringsprocessen Waterbodems (POSW) is onderzocht, of verwerking van baggerspecie een toepasbaar alternatief is voor het storten in grootschalige depots; dit overeenkomstig de geformuleerde beleidsdoelstelling.

Uit het POSW-programma zijn de afgelopen jaren interessante resultaten ten aanzien van de verwerking van baggerspecie na verwijdering (baggeren) naar voren gekomen, waarbij in een aantal gevallen een praktijktoets is gedaan in de vorm van de uitvoering van pilotsaneringen [1].

Ten aanzien van de in-situ saneringsmethode is binnen POSW aandacht besteed aan de biologische afbraak van PAK, olie en de organische stof in waterbodems binnen het natte profiel van waterlopen [2]. Hierbij is gewerkt met het toedienen van verschillende soorten preparaten aan watersystemen om de biologische activiteit in de bodem te stimuleren. De resultaten waren in het algemeen weinig positief. De feitelijke afbraak was door locatiespecifieke omstandigheden in het veld niet aantoonbaar en controleerbaar. In hoofdstuk 3 wordt hierop nader ingegaan.

Zonder duidelijke nuancering (vanuit de beperktheid van deze uitvoeringsvorm van biologische reiniging) zou dit kunnen leiden tot de veronderstelling, dat in-situ sanering van waterbodems niet mogelijk is. Recent uitgevoerde studies voor terrestrische bodems geven echter aan, dat deze conclusie niet zonder meer gerechtvaardigd is.

De discrepantie in visies, die hieruit zou kunnen ontstaan, over de mogelijkheden of onmogelijkheden van in-situ sanering van waterbodems vormde de directe aanleiding voor de programmacommissie van het PGBO om hierover meer duidelijkheid te scheppen.

1.2 Vraagstelling

De programmacommissie van het PGBO heeft aan **BOdemBeheer** bv de vraag gesteld om in samenwerking met TNO-MEP een studie uit te voeren met als doel: “het geven van inzicht in de mogelijkheden van in-situ waterbodemsanering”. Inhoudelijke randvoorwaarden zijn niet gesteld. Wel zijn de volgende aandachtspunten geformuleerd:

- Voor welke waterbodems vormt een in-situ aanpak een alternatief (welke verontreinigingen/welke speciesoorten)?
- Welke in-situ *bodemsanerings*concepten zijn toepasbaar voor waterbodems?
- Wat is reeds bekend zowel nationaal als internationaal?
- Welke acties moeten worden ondernomen om perspectiefvolle concepten te ontwikkelen?
- Welke risico's ten aanzien van de (grond)waterkwaliteit bestaan er bij de inzet van deze concepten in de praktijk?

1.3 Doelstelling

Het geven van inzicht in de (on)mogelijkheden van in-situ waterbodemsanering geldt als hoofddoelstelling voor dit project. Daarbij is het niet de bedoeling van de onderzoekers om “pasklare” concepten op tafel te leggen, maar veel meer om denkmodellen te presenteren. De ontwikkelde ideeën kunnen dan worden getoetst aan de mening van deskundigen op dit terrein en - indien mogelijk - aan concrete probleemgevallen. Een workshop over dit onderwerp aan het einde van de studie behoort derhalve tot een van de onderdelen van het project.

1.4 Afbakening

In het kader van deze studie is een aantal interviews gehouden met deskundigen op het gebied van waterbodemsanering en/of terrestrische in-situ sanering (zie bijlage 1). Daarbij is gebleken dat de problematiek van “in-situ sanering van waterbodems” in een zeer breed perspectief te plaatsen is, uiteenlopend van een benadering op doelniveau (beleidsmatige invalshoek) tot op middelenniveau (technisch-inhoudelijke invalshoek), maar ook inhoudelijk van een oriëntatie op een in-situ aanpak voor nieuw te vormen sediment in de vorm van preventieve maatregelen (biofiltratie, “slibvangbekkens” in rivieren, e.d.) tot een in-situ aanpak van bestaande waterbodems. Ook in het begrip “waterbodem” is differentiatie mogelijk van “droge” waterbodems (oevergronden of

periodiek natte gronden, zoals uiterwaarden) tot “natte” waterbodems (bodem binnen het hydraulische profiel van een watersysteem).

In overleg met de opdrachtgever hebben wij ons in het huidige onderzoek beperkt tot denkbare in-situ opties, primair gericht op bestaande waterbodems gelegen binnen het natte profiel van watersystemen (sliblagen). Een doorkijk wordt daarbij gemaakt naar reeds geborgen waterbodems in grootschalige natte depots (baggerspeciéstortplaatsen zoals de Slufter). Uitgangspunt is dat technieken waarvoor, mede ten behoeve van de behandeling, baggeren noodzakelijk is buiten het kader van deze studie vallen (“in-situ” behandeling in doorgangsdepots).

Ook wordt slechts zijdelings aandacht besteed aan de mogelijkheden voor de “droge” waterbodems (uiterwaarden). Hier ligt een duidelijker relatie met in-situ mogelijkheden voor terrestrische bodems. Alleen de omgevingscondities kunnen gecompliceerder zijn door overstromingskansen en de consequenties daarvan op het saneringsverloop.

Uitgangspunt is derhalve dat de waterbodem niet van zijn oorspronkelijke plaats wordt verwijderd. Naar onderhoudsbaggerspecie wordt in deze studie derhalve niet gekeken, anders dan de situatie waarbij dit onderhoud pas op lange termijn (> 10 jaar) zou moeten gaan plaatsvinden.

1.5 Leeswijzer

Het onderzoek naar de in-situ aanpak van waterbodemsanering is opgezet vanuit de wens om alle theoretisch denkbare mogelijkheden hiervoor aan een nadere beschouwing te onderwerpen. Dit betekent dat verder wordt gekeken dan alleen naar technieken die beogen een concentratievermindering van gehalten aan verontreinigende stoffen te bewerkstelligen.

In hoofdstuk 2 wordt om deze reden een algemene probleembeschrijving gegeven, met daaraan gekoppeld een visie waarop de genoemde theoretisch denkbare mogelijkheden kunnen worden gebaseerd.

In hoofdstuk 3 wordt vervolgens een inventarisatie gegeven van de denkbare opties, met een beschrijving ervan. Aan de verschillende opties worden technologische concepten gekoppeld, die in hoofdstuk 4 nader worden uitgewerkt en kwalitatief op haalbaarheid worden beoordeeld. Daarbij wordt voor zover mogelijk een doorvertaling naar de toepasbare technieken gegeven.

Hoofdstuk 5 geeft een doorkijk naar de praktische betekenis van een aantal technieken voor concrete situaties. Deze situaties vormen mede de basis voor een toetsing aan ervaringen opgedaan bij landbodemsanering en voor discussies in een workshop over dit onderwerp.

Hoofdstuk 6 bevat tenslotte een aantal conclusies en aanbevelingen voor het vervolgtraject.

Tijdens het onderzoek zijn diverse gesprekken gevoerd met inhoudelijk deskundigen op het gebied van (in-situ) (water)bodemsanering. De resultaten hiervan zijn integraal verwerkt in deze rapportage.

Ook is gebruikgemaakt van de adviezen van de begeleiders vanuit het PGBO voor dit project.

Een overzicht van de geïnterviewde personen en de begeleiders is opgenomen als bijlage 1. In bijlage 2 tenslotte wordt een overzicht gegeven ten behoeve van het inzicht in de aard en omvang van de waterbodempromblematiek en de verwachtingen ten aanzien van de kwaliteitsontwikkelingen in de toekomst.

2 Probleembeschrijving en visieontwikkeling

2.1 Probleembeschrijving en achtergronden

Als algemene probleemstelling is geformuleerd het betrekkelijk beperkte inzicht in de mogelijkheden van in-situ waterbodemsanering. Indien dit wordt geplaatst naast het snel voortschrijdende inzicht in de mogelijkheden van biologische in-situ sanering van terrestrische bodems, dan is de gedachte bij de aanvang van de studie om hiertussen een koppeling aan te brengen voor de hand liggend. Dat het inzicht in de mogelijkheden voor landbodems zich recentelijk zo sterk heeft ontwikkeld, wordt veroorzaakt door de impuls vanuit het NOBIS-programma aan de kennisontwikkeling op dit terrein, maar ook door de beleidsontwikkelingen richting functiegerichte bodemsanering en actief bodembeheer.

Bij een oriëntatie op de mogelijkheden voor in-situ sanering van waterbodems heeft de aandacht zich tot voor kort bijna uitsluitend gericht op het biologisch reinigen. In de praktijk is echter sprake van een zekere stagnatie in de ontwikkelingen van deze methode naar operationele technieken. Hiervoor zijn een aantal redenen.

Organische verontreinigende stoffen zijn in principe biologisch afbreekbaar. Momenteel is bekend, dat minerale olie, PAK en zelfs gechloreerde verbindingen als PCB's en chloorbenzenen biologisch kunnen worden afgebroken. De mate waarin en de snelheid waarmee afbraak plaatsvindt, is behalve van de biologische beschikbaarheid sterk afhankelijk van de omgevingscondities. Juist het vaststellen en efficiënt aanbrengen van de voor specifieke processen benodigde (optimale) omgevingscondities vormt voor waterbodems in de praktijk een groot probleem.

Een ander probleem vormt de grote diversiteit aan verontreinigende stoffen in de waterbodem, waarbij zware metalen in combinatie met organische stoffen voorkomen.

Zware metalen vormen in meerdere opzichten een knelpunt. Naast het feit dat ze niet biologisch worden afgebroken, kan de concentratie in oplossing toenemen door onder andere afbraak van organische stof en afname van de pH.

Ook kunnen "normproblemen" ontstaan door de koppeling van normen aan het organische stofgehalte, indien dit organische stofgehalte door afbraak sterk afneemt.

2.2 Ervaringen met in-situ sanering waterbodems

De ervaringen met in-situ sanering van waterbodems zijn voorzover bekend, in Nederland beperkt gebleven tot een in POSW-kader uitgevoerd grootschalig onderzoek, gericht op het testen van de werkzaamheid van een aantal preparaten die aan de waterbodem werden toegediend ten behoeve van de biologische afbraak van organische stof voor volumevermindering en verontreinigende stoffen.

In deze POSW-studie wordt, op basis van de resultaten, de effectiviteit van biologische in-situ reiniging bij praktijktoepassingen als gering ingeschat.

Daartegenover komt uit de studie naar voren, dat reiniging in depot, gericht op de biologische afbraak van organische gechloreerde verbindingen, wel voldoende perspectieven biedt om nader te onderzoeken. Dit onderzoek zou zich dan met name moeten richten op stofbalansen (uit analyse verwachte afbraakproducten) en verblijftijden. Een ander aandachtspunt in dit onderzoek zou moeten zijn de risico's die aan de dechloreringsproducten verbonden zijn voor het aquatische ecosysteem. Het is een interessante gedachte om de ervaringen verkregen onder "geconditioneerde" omstandigheden te vertalen naar de meer "open" situaties. In paragraaf 3.2 wordt uitgebreider op het POSW-onderzoek ingegaan.

Internationaal zijn ervaringen opgedaan in Canada (NO_3 toevoeging aan de waterbodem) en de US (anaërobe afbraak van PAK). De resultaten worden door de onderzoekers als positief aangemerkt.

2.3 Ontwikkelingen in het waterbodemsaneringsbeleid

Verontreinigde baggerspecie komt in Nederland hoofdzakelijk via twee sporen vrij. In de eerste plaats betreft het de specie uit onderhoudswerkzaamheden en in de tweede plaats specie uit saneringswerkzaamheden.

Het vrijkomen van (verontreinigde) baggerspecie bij onderhoudswerkzaamheden wordt primair bepaald door de eisen die aan het watersysteem worden gesteld en het niet meer kunnen voldoen aan deze eisen als gevolg van sedimentatie van vaste deeltjes. Zowel het verwijderingsmoment als de hoeveelheid te verwijderen baggerspecie worden hierbij voornamelijk door externe factoren bepaald. Normstelling speelt een rol bij de vaststelling, in welke mate er sprake is van zodanig sterk verontreinigd materiaal, dat hergebruik of verspreiding niet meer mogelijk is.

Voor saneringsspecie speelt de normstelling al eerder een rol, namelijk bij de vaststelling van de saneringsnoodzaak en -urgentie. De saneringsomvang wordt in dergelijke situaties (nog) voornamelijk bepaald door de normstelling, terwijl het saneringsmoment beleidsmatig is vastgelegd op basis van een urgentiebepaling.

Het aanbod aan verontreinigde baggerspecie, uitgedrukt in hoeveelheden per tijdsperiode, wordt derhalve bepaald door een combinatie van factoren die slechts in beperkte mate zijn te beïnvloeden.

Indien dit aanbod wordt geconfronteerd met de consequenties van verwerking, gemeten in termen van beleidsmatige voorkeuren, capaciteit en kosten, dan zijn zodanige problemen aanwezig, dat een specifiek sturend en regulerend beleid noodzakelijk is.

Ten aanzien van verwerking van verontreinigde baggerspecie bestaat beleidsmatig een voorkeur voor de wijze waarop dit dient plaats te vinden, die is afgeleid uit het afvalstoffenbeleid (zie figuur 1). Dit houdt in dat beleidsmatig een voorkeur bestaat voor preventie (het voorkomen van het ontstaan van verontreinigde baggerspecie in de toekomst). Vanuit het curatieve spoor zijn de opties (in volgorde van afnemende voorkeur):

- direct hergebruik;
- gebiedsgerichte toepassing;
- eenvoudige verwerking (ontwatering, scheiding, rijping, landfarming);
- intensievere verwerking (reinigen);
- storten.

Het beleid richt zich op verwerking van minimaal 20% van het aanbod aan verontreinigde specie (klasse 2, 3 en 4) na het jaar 2000. Ondanks het feit dat storten in het afvalstoffenbeleid de laatste plaats inneemt in de verwerkingsketen, zal deze oplossingsrichting, door de eerder genoemde knelpunten, voor waterbodems ook in de toekomst een belangrijke rol blijven vervullen. Het creëren van stortopties is ook nodig om (eenvoudige) verwerking waarbij residumateriaal ontstaat, mogelijk te maken.

Het feit dat ook in de toekomst op grote schaal gebruikgemaakt moet worden van de beleidsmatig minst gewenste oplossingsrichting, maakt dat ten aanzien van het omgaan met verontreinigde waterbodems c.q. verontreinigde baggerspecie op meerdere fronten gezocht wordt naar mogelijkheden die milieuhygiënisch, technisch en/of economisch minder bezwaarlijk zijn.

In de vierde nota Waterhuishouding is een aantal op het oog zeer verschillende “werkrichtingen” aangegeven die beleidsmatig en technisch onderlinge samenhang vertonen, zoals aangegeven in figuur 1. Het betreft de volgende activiteiten:

1. Het opstellen van een 10-jaren stappenplan waarbij onder andere wordt uitgewerkt hoe met de knelpunten op langere termijn om te gaan en hoe invulling te geven aan het voornemen samenhang aan te brengen tussen de aanpak van saneringsspecie en die van baggerwerk ten behoeve van vaarweg- en watergangonderhoud, zowel voor regionale als rijkswateren;
2. Het bevorderen van actief waterbodembeheer in het rivierengebied waar als gevolg van de complexiteit en grootschaligheid verwerking (vooralsnog) geen reële oplossing biedt. Toepassing in het eigen gebied wordt mogelijk gemaakt dankzij actief waterbodembeheer, met ruime aandacht voor risicobeheersing;
3. Verruiming van “hergebruik” door voorlopig – onder voorwaarden – door te gaan met verspreiden van matig verontreinigde specie (klasse 2) op het land en in oppervlaktewater;
4. Het verder stimuleren van gebiedsgericht hergebruik van baggerspecie, direct na baggeren of na verwerking;

5. Verruiming van toepassingsmogelijkheden binnen actief (water)bodembeheer (categorie 1 en 2 materiaal);
6. Het stimuleren van eenvoudige verwerkingstechnieken: rijpen, landfarmen, scheiden in sedimentatie-bekkens en hydrocyclonage (voorschrijven op grootschalige stortplaatsen) met een blijvende aandacht voor meer gespecialiseerde technieken;
7. Blijvend aandacht voor storten:
 - het realiseren van één of meer stortlocaties in of bij het Hollandsch Diep;
 - het uitvoeren van onderzoek naar mogelijkheden van baggerberging in diepe putten;
8. Het werken aan een nieuw beoordelingssysteem waarbij wordt overgegaan van een “klasse-benadering” naar een risicobeoordeling.

Uit het bovenstaande kan worden geconcludeerd, dat het beleid ten aanzien van waterbodem-saneringen als gevolg van het gebrek aan mogelijkheden (technisch en financieel) om het probleem op korte termijn op te lossen zich enerzijds richt op een functiegerichte en pragmatische aanpak, met nadruk op risicobeheersing, en anderzijds op het creëren van voldoende stortmogelijkheden voor die gevallen waarbij andere oplossingen als niet realistisch moeten worden aangemerkt (voor 80% van het aanbod aan verontreinigde species).

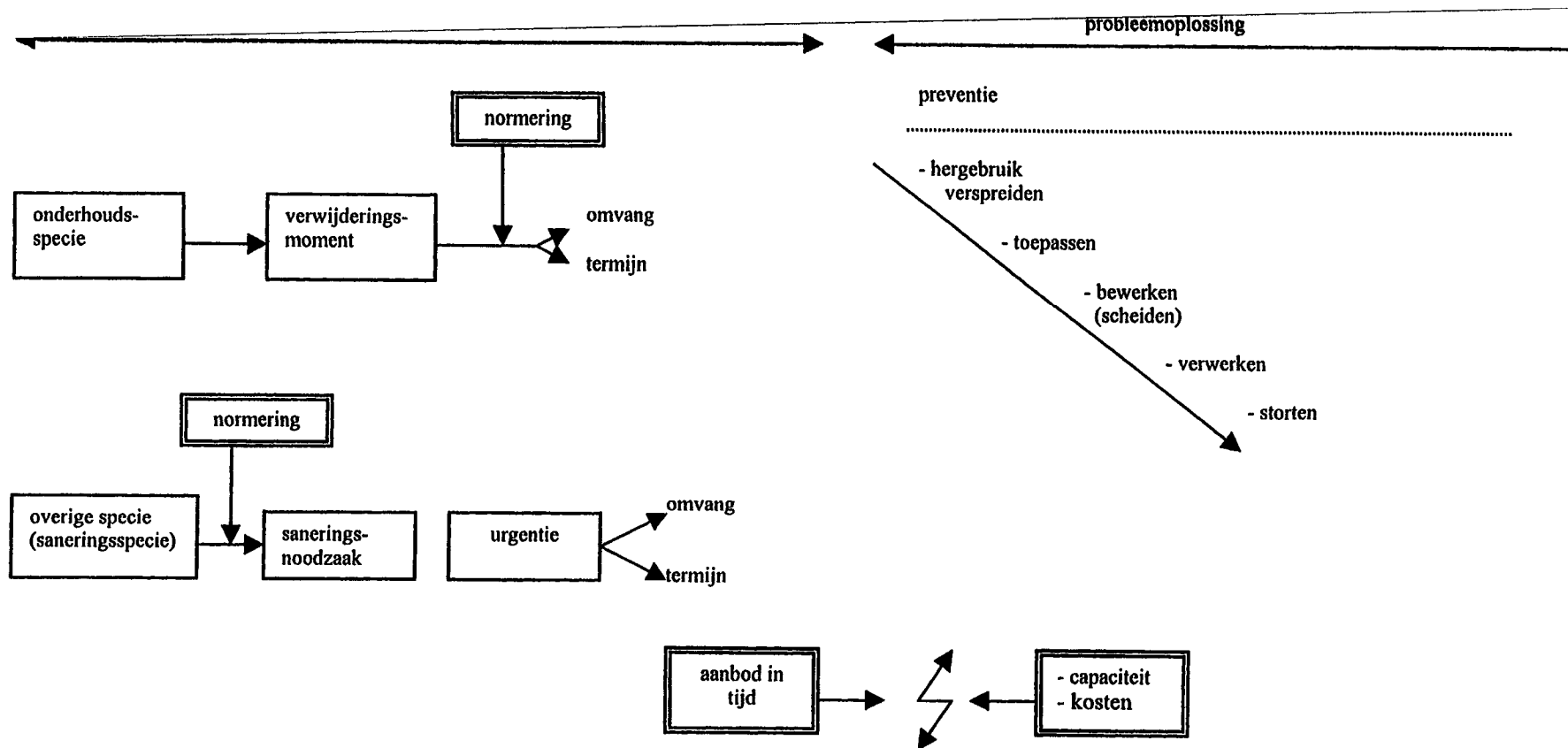
Wat opvalt is dat “de aanpak” zich met name concentreert op handelingen na verwijdering van het waterbodem materiaal. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door het feit dat de aanleiding om tot actie over te gaan vaak niet wordt ingegeven door de verontreinigingssituatie zelf maar om andere (nautische of waterhuishoudkundige) redenen. Ook de beleidsnotitie “Actief bodembeheer rivierbed” [21] richt zich met name op het scheppen van voorwaarden om de uitvoering van inrichtingsmaatregelen mogelijk te maken.

2.4 Ervaringen met in-situ sanering van landbodems

Voor landbodems is de interesse voor in-situ saneringen de laatste jaren zeer sterk toegenomen. De toenemende verantwoordelijkheid van veroorzakers van verontreiniging, eigenaren en gebruikers van terreinen, de drang om te zoeken naar goedkope oplossingen met minder belemmeringen voor het gebruik tijdens de uitvoering en de toenemende kennis van bodemprocessen hebben hierbij een stimulerende rol gespeeld.

De positieve resultaten van in-situ technieken bij goed doorlatende, homogene bodems en makkelijk afbreekbare stoffen riepen vragen op over de mogelijkheden in geval van heterogene en minder goed doorlatende bodems en stoffen die moeilijk biologisch afbreekbaar zijn. Deze vraagpunten vormden naast concrete, vanuit de praktijk geïdentificeerde knelpunten de basis van het in 1995 opgestarte NOBIS-programma.

De ontwikkelingen binnen NOBIS hebben onder invloed gestaan van externe ontwikkelingen. Zo is het denken over bodemsanering de afgelopen jaren sterk



- 1) het opstellen van een 10-jaren scenario waterbodemsanering (prioriteit saneringsspecie in samenloop met onderhouds-specie)
- 2) het bevorderen van actief waterbodembeheer
- 3) verruiming 'hergebruik' door voorlopig – onder voorwaarden – doorgaan met verspreiden op het land en in opp.water van matig verontreinigde baggerspecie
- 4) stimuleren hergebruik baggerspecie al dan niet na bewerking
- 5) verruiming toepassingsmogelijkheden binnen actief (water) bodembeheer
- 6) - stimuleren van eenvoudige bewerkingstechnieken
- vinger aan de pols bij geavanceerde technieken
- 7) blijvend aandacht voor storten
 - a) realiseren grootschalige stortlocatie in Holl.D
 - b) onderzoek naar mogelijkheden van baggerberg in diepe putten

Figuur 1: Oplossingsinrichtingen waterbodembroblematiek

veranderd, evenals de visie op het te bereiken saneringsresultaat, c.q. het na te streven saneringsdoel en de te volgen uitvoeringsstrategie. Voor de strategiebepaling van saneringsconcepten zijn vanuit NOBIS in de loop van de tijd de volgende uitgangspunten geformuleerd:

1. Benader het probleem vanuit risicobeoordeling;
2. Neem de tijd (start tijdig en sluit aan bij de van nature langzame biologische processen);
3. Benut het zelfreinigend vermogen van de bodem (intrinsieke afbraak);
4. Stimuleer natuurlijke processen (extensieve aanpak);
5. Ga over op intensieve in-situ reiniging als het moet (lees: niet anders kan).

Mede vanuit deze nieuwe kennis en beleidsontwikkelingen, ontwikkelt zich geleidelijk een filosofie, dat het aanbeveling verdient bij verontreinigde bodems primair te kijken naar de mogelijkheden van intrinsieke afbraak van verontreinigende stoffen op basis van de kenmerken van het systeem zelf. Ook de strategieën voor aanpak en sanering worden daarop afgestemd. Indien essentiële condities ontbreken, wordt in eerste instantie gekeken, of hierin met marginale ingrepen verandering is aan te brengen.

De lijn van denken in intensieve concepten wordt meer en meer verlegd naar een denklijn in extensieve concepten. Pas in tweede instantie volgt een benadering volgens een intensieve aanpak, indien het extensieve spoor te weinig perspectief biedt.

Bij het vinden van functionele, extensieve saneringsconcepten wordt een balans gezocht tussen risico-reductie, milieuverdienste en kosten. Projecten die in het NOBIS-programma binnen deze denklijn zijn opgestart en deels zijn uitgevoerd, richten zich specifiek op:

- natuurlijke afbraak (per- en trichlooretheen met sequentiële processen, extensieve biologische afbraak van VOCL, intrinsieke degradatie van PAK-verontreinigingen, e.d.);
- gestimuleerde intrinsieke afbraak (bioremediatie van HCH-locaties, anaërobe afbraak van BTEX, benzeenafbraak in een sterk reducerende bodem, gestimuleerde anaërobe in-situ biorestauratie van chloorethenen, e.d.);
- gestimuleerde afbraak met behulp van extensieve technieken (biodegradatie van organische micro's met schimmeltechnologie, in-situ sanering van gelaagde en slecht doorlatende gronden, Heterogene Extensieve In-situ SANering (HEISA), e.d.);
- bioschermen (biologische hekwerken, "funnel and gate", e.d.);
- landfarming/reiniging in depot (kwaliteitsverbetering baggerspecie op basis van extensieve biorestauratie in combinatie met energieteelt, reiniging van baggerspecie in depot, e.d.).

2.5 Ontwikkelingen in het bodemsaneringsbeleid

In juni 1997 is door het kabinet de nieuwe, landelijke richting voor het bodemsaneringsbeleid aangegeven. In dit kabinetsstandpunt is gekozen voor het sneller realiseren van een beheersbare situatie bij ernstig verontreinigde locaties. Dit zal gerealiseerd worden door de keuze van een andere saneringsdoelstelling, het beter benutten van de marktdynamiek en verdergaande decentralisatie. De keuze voor een andere saneringsdoelstelling houdt in dat het saneringsresultaat niet langer wordt bepaald op basis van "multifunctionaliteit, tenzij sprake is van locatiespecifieke factoren". Het kabinet stelt voor om de keuze voor het te realiseren saneringsresultaat veeleer afhankelijk te laten zijn van de functie die aan een locatie wordt toegekend bij immobiele verontreinigingssituaties en het kosteneffectief verwijderen bij mobiele verontreinigingen. Bij de uitwerking is voor dit laatste als uitgangspunt genomen, dat verspreidingsrisico's moeten worden opgeheven of tegengegaan. Dit kan het beste gebeuren door een verwijdering van de verontreinigingen, waarbij kosteneffectiviteitsoverwegingen in een ruime betekenis een rol spelen.

Geadviseerd is om als standaarddoelstelling hiervoor uit te gaan van het volgende:

- in de toekomst dient actieve nazorg zo veel mogelijk te worden voorkomen;
- het saneringsdoel moet liggen tussen de streefwaarde (s) en de tussenwaarde ($\frac{1}{2}(s + i)$);
- het saneringsdoel moet worden bereikt binnen een periode van 30 jaar na de start van de sanering;
- in geval van tijdelijke verspreiding buiten de oorspronkelijke contouren - onoverkomelijk om de doelstelling te bereiken -, dient de eindconcentratie daar uiteindelijk ook minimaal te liggen op het niveau van de afgesproken saneringsdoelstelling;
- ijkmomenten moeten zijn ingebouwd ten behoeve van (bij)sturing van het saneringsverloop.

Deze beleidsmatige koerswijziging zal met name positieve gevolgen hebben voor de mogelijkheden van in-situ saneringsconcepten en met name voor de extensieve concepten.

2.6 Een nieuwe denklijn en visies op in-situ sanering waterbodems

Het denken over bodemsanering zal in een totaal ander licht komen te staan met de voorgestelde beleidsveranderingen. Veel meer kan rekening worden gehouden met de mogelijkheden die van nature in de bodem aanwezig zijn. Rekening houdend met de natuurlijke veerkracht van de bodem zal de aandacht in het zoeken naar saneringsoplossingen zich ook kunnen gaan richten op het creëren van de juiste condities voor (gedeeltelijk) herstel van de kwaliteit, waarbij de bodem tot op zekere hoogte zelf haar eigen weg kan zoeken. De opbouw en samenstelling van de bodem die mede bepalend zijn voor de wijze waarop en de mate waarin verontreinigende stoffen zich

hebben verspreid, speelt in deze nieuwe benaderingswijze een bijzondere rol met het oog op de sanering.

Gelaagdheden, heterogeniteiten en doorgaande poriën vormen dan geen bedreigingen meer uit het oogpunt van verspreiding, maar moeten mogelijkheden bieden voor het op termijn (laten) verwijderen van stoffen in de bodem.

Voor waterbodems zijn de omstandigheden ten opzichte van de terrestrische bodems weliswaar geheel verschillend, maar het denken over principiële mogelijkheden hoeft daardoor niet direct te worden beïnvloed.

Het gewenste milieu voor biologische reiniging kan worden gecreëerd door een sturing van water- en luchtstromen. Bij waterbodems is dat veel moeilijker dan bij landbodems (met een redelijke doorlatendheid) vanwege het bovenstaande water en de vaak compactere onderlagen. In waterbodems is vaak een cocktail van verontreinigingen aanwezig, maar de vluchtige, goed oplosbare componenten maken daarvan nauwelijks deel uit. Verontreinigende stoffen zijn over het algemeen goed geabsorbeerd aan of geabsorbeerd in de bodemmatrix, met daardoor een geringe verspreidingscomponent en een beperkte biobeschikbaarheid.

Waterbodems zijn overwegend anaëroob, terwijl er ter plaatse sprake kan zijn van veel dynamiek (bijvoorbeeld sedimentatie en (re)suspensie) als gevolg van processen in het totale watersysteem.

Nadelige effecten op de omgeving (het oppervlaktewater) als gevolg van een in-situ aanpak kunnen snel optreden. Ook kan er sprake zijn van een bedreiging van een "rijk en levendig" bodemmilieu.

Al deze omstandigheden kunnen makkelijk worden opgevat als beperkend voor de mogelijkheden van in-situ sanering. Indien wij kijken naar de mate waarin er juist vanuit een langetermijn-visie ten aanzien van het bereiken van een functiegericht saneringsresultaat kansen aanwezig zijn door deze omstandigheden, ontstaat mogelijk een ander beeld.

3 Inventarisatie van opties voor in-situ aanpak waterbodemsanering

In het navolgende wordt een beschouwing opgezet over de principiële of (vanuit het werkingsprincipe) theoretische mogelijkheden van in-situ waterbodemsanering, zonder te letten op de locatiespecifieke omstandigheden en beleidsmatige randvoorwaarden. Deze theoretische benadering wordt vervolgens doorvertaald naar technologische concepten en technieken. De nadruk ligt daarbij op beeldvorming.

3.1 Overzicht van mogelijkheden

Een verstandige aanpak voor gevallen van verontreinigde waterbodems (met uitsluiting van die gevallen waarbij er een noodzaak tot baggeren bestaat) begint met een onderzoek naar de processen die zich lokaal in een waterbodem afspelen. Vervolgens wordt op basis van het verkregen inzicht in deze processen een inschatting gemaakt van het actuele risico van de verontreiniging en van de noodzaak en de mogelijkheden dit risico te beperken. Dit leidt tot een aanpak, die is afgeleid van de ontwikkelingen op het gebied van actief bodembeheer voor terrestrische bodems.

Als men volgens deze procedure te werk gaat, zullen de uiteindelijk als haalbaar beoordeelde opties sterk afhankelijk zijn van lokale condities. Op basis van theoretische overwegingen is zonder voorkennis van deze lokale omstandigheden een aantal opties geïdentificeerd. De beoordeling van de haalbaarheid zal dan ook per definitie globaal en kwalitatief van aard zijn. Tabel 1 geeft een overzicht van de geïdentificeerde opties. In deze tabel is onderscheid gemaakt in het type aanpak en de aard van de verontreinigende stoffen waarvoor de methode werkzaam is. Voorts is - om de gedachten te bepalen - onder elk type aanpak een aantal mogelijke technologische concepten genoemd.

Bij het opstellen van tabel 1 zijn op voorhand zo weinig mogelijk beperkingen in acht genomen. Technologische concepten uit de terrestrische bodemreiniging hebben bij de inventarisatie mede als vertrekpunt gediend. Basistechnieken die daar worden gebruikt als in-situ reinigingsmethode, zijn:

- grondwateronttrekking;
- idem, gecombineerd met biologische afbraak (biorestauratie);
- persluchtinjectie;
- idem, gecombineerd met biologische afbraak (biosparging);
- bodemluchtexttractie;
- idem, gecombineerd met biologische afbraak (bioventing).

De eerste vier technieken zijn gericht op behandeling van het grondwater, de laatste twee op behandeling van de bodemlucht. Bodemluchtexttractie en bioventing zijn bij (natte) waterbodems niet toepasbaar en worden daarom verder buiten beschouwing gelaten.

Tabel 1: *Theoretische mogelijkheden in-situ aanpak waterbodemsanering*

Type aanpak	Werkingsgebied contaminanten	Technologisch concept
Stimuleren van microbiologische afbraak	Organisch (PAK, olie, e.a.)	Afbraaksnelheid verhogen door toevoegen van elektronenacceptoren
		Afbraaksnelheid verhogen door toevoegen van geschikte micro-organismen
		Afbraaksnelheid verhogen door toevoegen van nutriënten
		Afbraaksnelheid verhogen door wijziging milieucondities
Stimuleren van microbiologische reductieve dechlorering	Gechloreerde Organische verbindingen	Processnelheid verhogen door wijziging milieucondities
Stimuleren van biologische afbraak	Organisch	Afbraak van contaminanten in plantendelen
Stimuleren van biologische concentrering en verwijdering	Metalen; vooral Ni en Zn, ook Cu, Co, Cr en Cd	Opname van metalen in planten (phyto-extractie)
	Fosfaten	Opname van fosfaten in planten (phyto-extractie)
Mobiliseren van verontreinigende stoffen	Alle	Mobiliseren, daarna vloeistoffase behandelen
Chemische omzetting	Alle, mits oxideerbaar of reduceerbaar	Chemische oxydatie/reductie van contaminanten
Vastleggen van verontr. stoffen (sorptie/immobilisatie)	Metalen	Precipitatie van metalen als hydroxide of minder goed oplosbaar complex
		Vastleggen van metalen met behulp van planten (phytostabilisatie)
		Precipitatie van metalen als sulfide
		Binding van metalen in anorganische matrix (koude of warme immobilisatie)
		Adsorptie van metalen aan klei of organische stof
	Organisch	Adsorptie van organische verontreinigingen aan klei en/of absorptie in organische stof
Beperken van advectieve verspreiding naar het opp.water	Alle	Verhogen van de hydraulische weerstand
		Stromingstechnische isolatie
Beperken van advectieve verspreiding naar het grondwater	Alle	Verhogen hydraulische weerstand
		Hydrologische isolatie
Niet ingrijpen	Alle	Beperken van risico's

Allerlei combinaties van basistechnieken zijn ook mogelijk. Naast de hierboven vermelde technieken kunnen ook nog technieken worden genoemd, die gepaard gaan met een zeer hoog energieverbruik (o.a. stoomstrippen en elektroreclamatie). Deze laatst genoemde opties zijn voor waterbodems niet toepasbaar en blijven verder eveneens buiten beschouwing.

Het toepassingsgebied van terrestrische in-situ sanering richt zich vooral op goed doorlatende bodems met mobiele, vluchtige en/of aëroob afbreekbare verontreinigende stoffen. Zware metalen, PAK's en cyanides worden in het algemeen niet met in-situ methoden aangepakt. De laatste jaren wordt er wel veel onderzoek gedaan naar uitbreiding van het toepassingsgebied tot anaërobe afbraak en reductieve dechlorering. Onder deze condities is het wellicht ook mogelijk om zware metalen in sulfidische vorm te immobiliseren.

Een belangrijk verschil tussen de situatie bij de terrestrische problematiek ten opzichte van de waterbodemproblematiek (naast de verschillen in ecologische en verspreidingsrisico's: zie par. 2.6) is gelegen in de mate waarin het mogelijk is om (grond)water- en luchtstromen te sturen en in het (overwegende) verontreinigingstype.

In dit hoofdstuk beperken we ons tot een globale omschrijving van de in tabel 1 genoemde opties. In het volgende hoofdstuk geven we voor de meest relevante opties een nadere invulling van de methode en een kwalitatieve beoordeling van de kosteneffectiviteit en de effecten op de omgeving. Voor elk type aanpak volgt hieronder een beschrijving. De grootste uitdaging lijkt te liggen in de ontwikkeling en de toepassing van biologische technieken, enerzijds met het oog op de beleidsontwikkelingen en anderzijds vanwege de bestaande kennis en ervaring bij terrestrische bodems. Daarom zal aan deze technieken in het volgende relatief veel aandacht worden geschonken.

3.2 Stimuleren van microbiologische afbraak

Het meest voor de hand liggende concept bij in-situ sanering van waterbodems is de microbiologische afbraak van verontreinigende stoffen. Deze is gebaseerd op het vermogen van micro-organismen (bacteriën en schimmels) om bepaalde stoffen af te breken tot kleinere, onschadelijke moleculen. De verontreinigende stoffen vormen meestal het "voedsel" voor deze organismen. Voor een biologische afbraak moeten de juiste micro-organismen in voldoende aantallen aanwezig zijn (geschikte milieucondities) en moeten de betreffende stoffen in beginsel biologisch afbreekbaar zijn. Daarnaast moeten deze stoffen beschikbaar zijn voor de micro-organismen.

In principe zijn vrijwel alle verontreinigende *organische* stoffen biologisch afbreekbaar. Tot op welke hoogte deze afbraak ook in de praktijk plaatsvindt, hangt af van de lokale omstandigheden. Momenteel is van minerale olie, PAK en een groot aantal gechloreerde verbindingen, waaronder PCB's en chloorbenzenen bekend, dat ze biologisch afgebroken

kunnen worden. Deze biologische omzettingen gaan gepaard met een (gedeeltelijke) afbraak van de organische stof. Vaak neemt de pH af als gevolg van koolzuurproductie bij deze afbraak. Ook door de productie van organische zuren en ammoniak bij de afbraak neemt de pH af (in het laatstgenoemde geval na omzetting van ammoniak tot nitraat). Door de pH-verlaging neemt de concentratie aan zware metalen in oplossing toe. Dit wordt mede veroorzaakt door de afbraak van organische stof, waaraan de zware metalen gebonden zijn. Verder heeft het verlaagde organische stofgehalte tot gevolg, dat de toelaatbare concentraties aan verontreinigende stoffen volgens de vigerende normen lager worden. De afbraakprocessen kunnen derhalve bij sedimenten die oorspronkelijk rijk waren aan organische stof, resulteren in een overschrijding van de norm.

Voor het optreden van oxidatieve afbraak van verontreinigende koolwaterstoffen is het nodig, dat zowel micro-organismen, elektronenacceptoren (bijvoorbeeld zuurstof), als de verontreinigende stof tegelijkertijd op dezelfde plaats aanwezig zijn [8]. De verontreinigende stof dient daarbij als koolstof- en energiebron voor de micro-organismen of kan via een cometabolisch mechanisme worden afgebroken. De uiteindelijk gewenste producten zijn koolzuur en water.

Belangrijk voor de snelheid van biologische afbraakprocessen zijn de volgende factoren:

- de aanwezigheid van geschikte micro-organismen (meestal bacteriën);
- de beschikbaarheid van elektronenacceptoren (bijv. zuurstof);
- de beschikbaarheid van cometabolisme inducerende substraten;
- de beschikbaarheid van nutriënten;
- een niet extreme zuurgraad (pH rond neutraal);
- een milde temperatuur (15°C tot 35°C activiteit; optimum bij 30 à 35 °C);
- de afwezigheid van componenten in toxische concentraties (bijv. zware metalen);
- de biologische beschikbaarheid van de betreffende verontreinigende stoffen, die met name wordt bepaald door:
 - de samenstelling van de bodem (met name bodemtype en gehalte aan klei en organische stof);
 - de milieucondities (zuurgraad, redoxtoestand, zoutgehalte, temperatuur);
 - de aard en verschijningsvorm van de verontreinigende stoffen (mede bepaald door de tijd ten gevolge van het "verouderingseffect").

Voor het stimuleren van de biologische afbraak (vergroten van de afbraaksnelheid) kunnen bovengenoemde factoren als uitgangspunt dienen. Daarbij heeft men theoretisch de keuze uit:

- het aanpassen van de veldomstandigheden om voor de geschikte bacteriën een gunstiger omgeving te creëren of om de beschikbaarheid van de verontreinigende stoffen te vergroten;
- het toevoegen van entmateriaal met micro-organismen die aan de af te breken stof zijn geadapteerd (overbruggen/verkorten van de beginfase) of van meer competitief gemaakte specifieke bacteriën.

Op deze mogelijkheden wordt hieronder nader ingegaan.

Vrijwel altijd zijn er in de (water)bodem voldoende micro-organismen aanwezig om biodegradatie te laten plaatsvinden. De samenstelling van de aanwezige populatie wordt in feite bepaald door de overige factoren, zoals de milieucondities en de aard van de aanwezige stoffen. Alleen bij "verse" verontreinigingen of bij snelle wijzigingen van de milieucondities kan het voorkomen, dat de populatie zich nog niet heeft aangepast aan de nieuwe omstandigheden. Door het toevoegen van entmateriaal met reeds aan de af te breken stof(fen) geadapteerde micro-organismen kan in dit geval de beginfase van deze groei worden versneld.

In de meeste gevallen van waterbodemverontreiniging zijn de verontreinigende stoffen echter al lange tijd in het bodemmateriaal aanwezig, zodat de aanwezige microflora in evenwicht is met de heersende milieucondities. Toegevoegde micro-organismen die afwijken van de in de waterbodem bestaande populatie, hebben daardoor een kleinere overlevingskans, omdat ze zich nog niet aan het aanwezige milieu hebben kunnen aanpassen. De toegevoegde organismen kunnen door de natuurlijk gevormde populatie worden weggeconcentreerd. In theorie is het mogelijk om bijvoorbeeld door genetische manipulatie organismen meer competitief te maken. Vooralsnog wordt deze aanpak echter niet als een reële beschouwd. Voor terrestrische bodems is dit spoor reeds verlaten.

Omstreeks 1992 kwam een aantal procédés voor biologische in-situ reiniging voor waterbodems op de Nederlandse markt. Deze procédés waren gebaseerd op het toedienen (via uitstrooien of actief mengen) van preparaten aan de waterbodem. Oorspronkelijk waren deze middelen bedoeld voor het zogenaamde "bio-baggeren": het verminderen van het volume van het sediment en derhalve de sliblaagdikte. Daarnaast zouden deze middelen verontreinigende stoffen als olie en PAK aan kunnen pakken. De preparaten bevatten de voor de afbraak benodigde ingrediënten: bacteriën, nutriënten en/of zuurstofhoudende verbindingen. Binnen POSW zijn vier van deze procédés nader onderzocht op hun effectiviteit en de toepasbaarheid onder locatiespecifieke omstandigheden (zie kader).

De in het POSW-onderzoek verkregen resultaten waren in het algemeen weinig positief. De feitelijke afbraak onder veldcondities was door locatiespecifieke omstandigheden niet aantoonbaar en niet controleerbaar. In het laboratorium werd ook eenduidig vastgesteld, dat het toevoegen van preparaten aan het sediment niet effectief was. De oorzaak moet worden gezocht in een niet doelmatige toelevering van zuurstof. Er is zoveel zuurstof verbruikend materiaal in de waterbodem aanwezig, dat de afbraak van verontreinigende stoffen door de toevoeging niet wordt versneld. Daarnaast fungeert de organische stof als "drager" voor zware metalen en andere verontreinigende stoffen en heeft afbraak van de organische stof consequenties voor de beschikbaarheid van deze verontreinigende stoffen voor het watersysteem.

Vanwege de mogelijke effecten op de kwaliteit van het oppervlaktewater, en de daaruit voortvloeiende risico's, is door RIZA geadviseerd het toepassen van dergelijke procédés WVO-plichtig te stellen. Er kan nog worden opgemerkt, dat de volumevermindering van de specie die optreedt ten gevolge van het toevoegen van de preparaten, vaak berust op de

werking van de daarin aanwezige kalk, of andere stoffen die invloed hebben op de bodemstructuur en/of de pH.

Effectiviteit van aan de waterbodem toegevoegde preparaten

In het laboratorium is vastgesteld, dat onder optimale condities (waaronder menging en beluchting) afbraak van olie en PAK optrad. Zonder toevoeging van lucht werd geen afbraak van PAK waargenomen (zelfs een lichte toename). 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-gehalten, oliegehalten en sliblaagdikte. Geen van de producten is in staat gebleken de anaërobie van de waterbodem op te heffen

In POSW-verband is er aandacht besteed aan de biologische in-situ afbraak van PAK's en olie en de organische stof van waterbodems binnen het natte profiel van waterlopen. Hierbij zijn verschillende soorten preparaten met bacteriën, nutriënten en/of zuurstofdragers aan watersystemen toegediend. Het onderzoek heeft bestaan uit de volgende onderdelen:

- literatuuronderzoek naar productinformatie en eerder uitgevoerde praktijkproeven;
- laboratoriumonderzoek gericht op de chemische en bacteriële samenstelling;
- praktijkproef gericht op de bepaling van de effectiviteit en effecten onder verschillende omstandigheden;
- totaal-evaluatie en rapportage;
- opstellen WVO-advies.

Door RIZA wordt op basis van deze resultaten de effectiviteit van deze biologische in-situ reinigingsmethode bij praktijktoepassingen als gering ingeschat. Daartegenover is RIZA van mening, dat reiniging in depot, gericht op de biologische afbraak van organische gechloreerde verbindingen, wel voldoende perspectieven biedt om nader te onderzoeken. Dit onderzoek zou zich dan met name moeten richten op stofbalansen (uit afbraak verwachte afbraakproducten), verblijftijden en de risico's die aan de dechloreringsproducten verbonden zijn.

Ondanks de negatieve ervaringen van POSW is de ontwikkeling van soortgelijke preparaten elders wel doorgestaan, bijvoorbeeld in het Canadese National Water Research Institute (NWRRI) [22].

De redoxpotentiaal in de bodem bepaalt in zeer belangrijke mate de aard van de optredende biologische afbraakprocessen. Er wordt onderscheid gemaakt in de volgende typen processen:

- Aërobe ademhaling (met zuurstof);
- Anaërobe ademhaling, in volgorde van afnemende redoxpotentiaal onder te verdelen in:
 - nitraatreductie (tot stikstof of ammoniumzouten);
 - mangaan (IV) reductie tot mangaan (II);
 - ijzer (III) reductie tot ijzer II;
 - sulfaatreductie (tot sulfide);
 - methaanvorming en acetogenese (door reductie van CO₂); methaanvorming kan ook optreden door reductie van o.a. acetaat, formiaat, of methanol;

- Fermentatie (van toenemend belang bij lagere redoxpotentiaal; brokstukken van grote moleculen worden door fermentatie omgezet in waterstof en organische zuren of alcoholen, die vervolgens met behulp van elektronenacceptoren verder worden afgebroken).

Bij aërobe processen is de toelevering van de elektronenacceptor (zuurstof) vaak de snelheidsbepalende stap. Bij een goede toelevering van zuurstof kunnen veel verontreinigende stoffen snel aëroob door micro-organismen worden afgebroken. Daaronder vallen verbindingen die vaak in verontreinigde waterbodems voorkomen, zoals minerale olie (een mengsel van een groot aantal verschillende koolwaterstoffen) en polycyclische aromaten (PAK's). Van deze laatste kunnen met name de lichte verbindingen (2- en 3-rings PAK's) in principe goed worden afgebroken. De afbraak van 4-, 5- en 6-rings PAK's gaat langzamer. Ook voor minerale oliecomponenten geldt, dat de afbraak van zwaardere verbindingen (met hogere molecuulmassa) langzamer gaat dan die van lichte verbindingen. Dit effect wordt nog versterkt door de lagere beschikbaarheid van de verbindingen met hogere molecuulmassa's.

In de waterbodem is alleen in een dunne toplaag zuurstof aanwezig. Onder deze toplaag heersen anoxische condities, waarin zich anaërobe processen afspelen. De aërobe afbraak van PAK's en andere koolwaterstoffen, zoals minerale olie, vindt onder natuurlijke omstandigheden dan ook slechts in zeer beperkte mate plaats.

Bij de anaërobe afbraak van verontreinigende stoffen treedt niet moleculaire zuurstof als elektronenacceptor op, maar wordt deze functie vervuld door andere stoffen, zoals NO_3^- , Mn^{4+} , Fe^{3+} , SO_4^{2-} , of CO_2 . Onlangs is de mineralisatie van PAK's en n-alkanen met lange ketens in mariene sedimenten onder sulfaat-reducerende condities gerapporteerd [6, 15]. De afbraaksnelheid bij anaërobe processen is doorgaans veel lager dan bij aërobe processen. Daardoor zal nu veel vaker het afbraakproces zelf de snelheidsbepalende stap vormen. In de anaërobe waterbodemplaat vinden ook veel concurrerende biologische processen plaats. Daarbij zal de afbraak van verontreinigende stoffen vaak pas plaatsvinden, nadat de aanwezige bacterieflora de gemakkelijker te metaboliseren stoffen heeft omgezet.

De natuurlijke afbraak van verontreinigende stoffen kan zich pas manifesteren, zodra de belasting (bijvoorbeeld door diffuse bronnen) kleiner wordt dan de afbraaksnelheid. Vooral nog is dit in het algemeen niet het geval. Er vindt bijvoorbeeld nog steeds oplading van regionale wateren met verontreinigende stoffen, zoals PAK's, plaats. De halfwaardetijden voor anaërobe afbraakprocessen onder praktijkcondities (als deze al plaatsvinden) worden geschat op minimaal 20 à 30 jaar.

Een gebrek aan nutriënten (N,P) is zelden beperkend voor de snelheid van het afbraakproces. Het toevoegen van deze stoffen is dus meestal niet nodig. Het tegendeel is vaak wel het geval: door de introductie van nutriënten kan de waterkwaliteit negatief

worden beïnvloed. Hetzelfde geldt voor het toevoegen van cometabolisme inducerend substraat, of middelen om de biologische beschikbaarheid van contaminanten te vergroten (zie kader).

Zeer wezenlijk voor de vraag in welke mate en met welke snelheid de afbraak daadwerkelijk optreedt, is de biologische beschikbaarheid van de betreffende verontreiniging. Deze beschikbaarheid wordt bepaald door:

- de oplosbaarheid van de betreffende verbindingen, mede afhankelijk van de milieuocondities (pH, Eh, temperatuur, concentratie van zouten en detergentia, e.a.);
- de samenstelling van de waterbodem;
- de wijze waarop de verontreinigende stoffen in het bodemmateriaal voorkomen (in de vorm van deeltjes, geabsorbeerd in de organische stof, geadsorbeerd aan bodemdeeltjes, etc.).

Belangrijk in dit verband is ook de ouderdom van de verontreiniging ("ageing effect"). De beschikbaarheid kan worden verhoogd door bijvoorbeeld beluchting (opwerveling van bodemdeeltjes, afbraak van organische stof). Dit vergroot echter ook de verspreidingskans van de contaminanten (niet alleen organische verontreinigende stoffen, maar ook zware metalen).

Wat betreft de aard en de wijze van voorkomen van de verontreinigende stoffen kunnen enkele belangrijke verschillen tussen terrestrische bodemverontreinigingen en waterbodemverontreinigingen worden geconstateerd. Een aantal relatief goed afbreekbare verontreinigende stoffen (bijvoorbeeld: BTEX, vluchtige gechlloreerde koolwaterstoffen, zoals per- en trichloorethyleen) komt - in tegenstelling tot de situatie bij terrestrische bodemverontreiniging - in waterbodems niet of nauwelijks voor. Daarnaast is het referentietijdstip ten opzichte waarvan de afbraak wordt gemeten van belang. Vaak zijn de verontreinigende stoffen al lange tijd in de waterbodem aanwezig. De biologische beschikbaarheid wordt dan verminderd, doordat de verontreinigende stoffen als gevolg van diffusie- en sorptieprocessen de gelegenheid hebben gehad tot diep in de bodemdeeltjes door te dringen.

3.3 Stimuleren van reductieve dechlorering en verdere afbraak

In waterbodems komen veel gechlloreerde verbindingen als verontreiniging voor. Hiervan is lange tijd aangenomen, dat ze onder anaërobe condities niet afbreekbaar zijn. Er is de laatste jaren echter een aantal publicaties [11, 12] verschenen, waaruit duidelijk is geworden, dat veel van deze verbindingen (PCB's, HCB, e.a.), toch anaëroob kunnen worden afgebroken. Reductieve dechlorering is voor deze hoog gechlloreerde verbindingen vaak een belangrijke eerste stap in het proces. Dit proces vergt sterk reducerende (het liefst methanogene) omstandigheden.

In een aantal gevallen, bijvoorbeeld bij de afbraak van hoog gechlloreerde koolwaterstoffen, zoals polychloorbifenylen (PCB's) en chloorbenzenen, is een combinatie van anaërobe en aërobe afbraak noodzakelijk. De eerste (dechlorerings)stappen zijn anaëroob en kunnen leiden tot een vermindering van de toxiciteit; voor verdere afbraak

(vermindering van de massa) zijn aërobe omstandigheden noodzakelijk. Transport van de verontreinigende stoffen van een anoxische naar een oxische zone is niet eenvoudig. Een mogelijkheid om daarin te voorzien is het toepassen van "microbiële matten", waarin oxische en anoxische zones zeer dicht bij elkaar voorkomen, dan wel elkaar afwisselen onder invloed van lichtcondities [19].

In het algemeen is in praktijkomstandigheden de snelheid van anaërobe afbraak echter uiterst gering. Bij experimenten op laboratorium-schaal is het van belang te bedenken, dat de biologische beschikbaarheid van de stoffen vaak hoger is dan onder veldomstandigheden. Ter illustratie hiervan kan de afbraak van DDT worden genoemd [5]. Een ander aandachtspunt vormt het ontstaan van dechloreringsproducten en de mogelijke risico's daarvan voor de omgeving.

Voor de afbraak van PCB's geldt verder, dat deze stoffen veelal niet direct als groeistrukt kunnen worden gebruikt, zodat een cometabolisme inducerend substraat moet worden toegevoegd. Op basis van een theoretische beschouwing zouden deze processen kunnen worden versneld door het toevoegen van een koolstofbron en ook door de temperatuur te verhogen. De betekenis van deze maatregelen voor de realisatie van een kortetermijn-saneringsresultaat is echter gering. Dit leidt tot de conclusie, dat bij het beoordelen van dit type processen het uitoefenen van geduld belangrijk is, naast het terugdringen van de invloed van (al dan niet diffuse) bronnen en - zolang dat nog niet is gelukt - het beperken van de uit de verontreiniging voortkomende risico's.

3.4 Stimuleren van biologische afbraak

Behalve in micro-organismen kan de afbraak van verontreinigende stoffen ook plaatsvinden in hogere organismen (planten). Momenteel is er over de mogelijkheden van deze optie nog relatief weinig bekend. Nader onderzoek zou hierover helderheid moeten verschaffen. In de USA wordt aan dit onderwerp gewerkt [18].

3.5 Stimuleren van biologische concentrering en verwijdering

Met deze aanpak wordt niet de afbraak, maar de concentrering van de verontreinigende stof beoogd. Dit geldt met name voor de extractie van metalen in hyperaccumulerende gewassen. Deze phyto-extractie is een van de vormen van phytoremediatie. Andere vormen zijn rhizofiltratie (wortelzonebehandeling) en phytostabilisatie (zie ook onder 3.8 en 3.9). Voor beide technieken geldt, dat ze eerder zijn te beschouwen als waterzuiverings- dan als bodemreinigingstechniek.

3.6 Mobiliseren van verontreinigende stoffen

Deze (theoretische) mogelijkheid komt in aanmerking, als stoffen ergens heen kunnen worden getransporteerd waar ze een kleiner risico opleveren, of waar behandeling beter mogelijk is. Dit geldt zowel voor metalen als voor organische verontreinigingen. In het geval van metalen kan men denken aan het gebruik van complexerende stoffen, aan het (lokaal) wijzigen van de pH, of aan elektrokinetische remediatie. In het geval van organische contaminanten kan men denken aan het gebruik van organische oplosmiddelen en/of detergentia. Ook temperatuurverhoging kan een mobiliserend effect hebben. Vooral nog moet de haalbaarheid van al deze opties als laag worden ingeschat.

3.7 Toepassing van chemische omzettingen

Theoretisch kan worden gedacht aan omzettingen naar minder toxische stoffen. Bij de beoordeling daarvan is vermindering van risico's het sleutelbegrip. Chemische omzettingen (met name hydrolyse) van organische verontreinigingen, zoals PAK's en gechloreerde verbindingen, komen in de praktijk nauwelijks voor en kunnen daarom buiten beschouwing worden gelaten. Het toevoegen van oxidatiemiddelen, zoals waterstofperoxide, is te duur vanwege de hoge zuurstofvraag in sedimenten (zie ook 3.2). Ook vergunningtechnisch levert dit in de huidige praktijk problemen op.

De methode komt derhalve neer op beïnvloeding van de mobiliteit (zie 3.5 en 3.6). Bij metalen kan daarbij worden gedacht aan oxidatie/reductiereacties, zoals het aanleggen van moerasachtige zones ("wet-lands") waarbij metaalsulfaten worden omgezet in sulfiden en als zodanig worden geprecipiteerd. Gezien de beschreven toepassingen (met name zuivering van effluent uit mijnen) moet deze stabilisatietechniek strikt genomen eerder als een waterzuiveringsmethode worden gezien dan als een bodemreinigingsmethode. Ook het toelaten van zoute kwel in gebieden met hoge concentraties sulfaat in het grondwater is een mogelijkheid om de metalen onder anaërobe condities als sulfiden te laten neerslaan.

3.8 Vastleggen van verontreinigende stoffen (sorptie/immobilisatie)

Metalen kunnen niet worden afgebroken. Hiervoor geldt, dat alleen verwijdering (zie 3.4) of vastlegging (sorptie/immobilisatie) een oplossing biedt ter beperking van actuele risico's in een geval van saneringsnoodzaak.

Het gecombineerd voorkomen van zware metalen en organische microverontreinigingen maakt het echter lastig om een voor alle stoffen geschikt immobilisatiemiddel te vinden dat aan de waterbodem kan worden toegevoegd. In principe kunnen metalen worden vastgelegd door precipitatie (bijvoorbeeld als hydroxide of als fosfaat), verandering van

de redoxtoestand (zie 3.7), of binding aan organische stof. De vastlegging van metalen kan worden versterkt door beplanting (phytostabilisatie). De functie van planten is dan tweeledig:

1. beperking van de watererosie, en
2. precipitatie of adsorptie van metalen bij of aan de worteloppervlakken.

De eerste functie hoort eigenlijk meer bij de beperking van de verspreiding naar het oppervlaktewater (zie 3.9). Bij het tweede proces kunnen micro-organismen een belangrijke rol spelen, eventueel ook door de pH of de redoxpotentiaal in de omgeving van de plantenwortels te veranderen.

Ook organische verontreinigingen kunnen worden vastgelegd door adsorptie aan of absorptie in organische stof. Dat geldt ook voor fosfaten, bijvoorbeeld als ijzer(III)fosfaat. Van deze methode wordt gebruikgemaakt bij de zuivering van water voor de ingang van een spaarbekken ten behoeve van de bereiding van drinkwater [4]. Bij eutrofe waterbodems kan deze methode ook worden gebruikt. In het verleden zijn er proeven uitgevoerd met fosfaatfixatie in de waterbodem door middel van het doseren van ijzer(III)chloride. De resultaten waren echter niet erg bemoedigend. Er moet rekening mee worden gehouden, dat als gevolg van wijziging in de redoxtoestand ($\text{Fe(III)} \rightarrow \text{Fe(II)}$) de duurzaamheid van de fixatie kan worden beïnvloed.

3.9 Beperken van advectieve verspreiding naar het oppervlaktewater

Als de verspreiding naar het grondwater geen ernstig risico vormt, komt capping (afdekken van de toplaag) als in-situ aanpak in aanmerking. Indien de kwaliteit van het grondwater wel wordt bedreigd, moet worden nagegaan in hoeverre het afdekken van de toplaag ook voor deze bedreiging een remedie is.

Een andere optie is het verdichten van de waterbodem, bijvoorbeeld met trilnaalden, met als doel de doorlatendheid van de bodem en daardoor de verspreiding van contaminanten naar het oppervlaktewater te verminderen. Ook vermindering van watererosie door beplanting (phytostabilisatie) kan hier worden genoemd (zie ook 3.8).

3.10 Beperken van advectieve verspreiding naar het grondwater

De verspreiding van verontreinigende stoffen naar het grondwater kan een probleem zijn in het geval van inzijgingssituaties. Om deze verspreiding te beperken komen dezelfde methoden in aanmerking als genoemd onder 3.9. Daarnaast komen geohydrologische maatregelen in aanmerking, die wijzigingen aanbrengen in de richting en/of de sterkte van de grondwaterstroom.

3.11 Niet ingrijpen

De toxiciteit van het sediment is in de laatste jaren in een aantal situaties, zoals bijvoorbeeld de Biesbosch, sterk verminderd als gevolg van het feit dat de recent gevormde sedimenten aanzienlijk schoner zijn dan die van enkele tientallen jaren geleden [17]. Het niet ingrijpen zou dan van alle mogelijke opties wel eens de minst slechte kunnen zijn. Op zich lijkt het wel wat wrang om de verbetering van de sedimentkwaliteit nu te gebruiken als reden om niet in te grijpen, terwijl in het verleden juist het voortduren van de aanvoer van verontreinigd sediment is gebruikt als argument om niet tot sanering over te gaan. De gewijzigde inzichten in de mogelijkheden van natuurlijke afbraak en in de actuele risico's van (water)bodemverontreiniging zijn hiervan mede de oorzaak.

Bepalend voor de keuze is het zoveel mogelijk beperken van de actuele toxicologische risico's en van de verspreiding van verontreinigende stoffen. Bij het beperken van de risico's kan als maatregel ook worden gedacht aan het wijzigen van de functie van de locatie, bijvoorbeeld als de risico's het aquatische ecosysteem betreffen.

4 Meest relevante opties voor in-situ waterbodemsanering

In dit hoofdstuk worden de meest relevante opties uit het vorige hoofdstuk verder uitgewerkt. Van deze opties wordt een overzicht gegeven in tabel 2. Ten opzichte van tabel 1 is deze tabel uitgebreid met een kolom waarin een nadere invulling van het technologische concept wordt gegeven en met een tweetal kolommen, waarin subjectief een kwalitatief oordeel wordt gegeven over de haalbaarheid op basis van overwegingen van respectievelijk effectiviteit plus kosten en effecten op de omgeving. Daarbij moet worden bedacht, dat in het algemeen met de opties nauwelijks of geen praktijkervaring is opgedaan, zodat een nader onderzoek naar de haalbaarheid steeds noodzakelijk zal zijn om een meer gefundeerd oordeel te kunnen geven. De waardering voor de combinatie “effectiviteit plus kosten” kan inhouden dat een optie weliswaar goedkoop is maar naar verwachting nauwelijks effectief zal zijn.

4.1 Stimuleren van microbiologische afbraak

Door de aard van de waterbodems en met name de daarin optredende omgevingsfactoren is het toepassen van biologische in-situ remediatietechnieken, die bij landbodems in zwang zijn (spoelen, bodemluchtonttrekking, persluchtinjectie), nauwelijks of niet haalbaar. Ook geven alternatieve opties om lucht in te brengen (bijvoorbeeld met behulp van beluchtingselementen, of turbinemengers/-beluchters) aanleiding tot negatieve effecten op het oppervlaktewater, zoals het suspenderen van verontreinigd slib, waardoor contaminanten worden gemobiliseerd. Bovendien geldt voor al deze technieken, evenals voor het introduceren van alternatieve oxidatiemiddelen, de beperking die al is genoemd: de zuurstofvraag van het sediment is veel groter dan die van de verontreinigende stoffen alleen. De kosten van dit soort opties worden daardoor al snel prohibitief. De mogelijkheden om de snelheid van de aërobe afbraakprocessen in-situ te verhogen zijn derhalve zeer beperkt. Een situatie waarin deze aanpak kan worden overwogen, is het geval van een waterbodem met een relatief kleine oppervlakte, waarbij de mogelijkheid bestaat om de waterbodem met de bovenstaande waterkolom hydrologisch tijdelijk van de omgeving te isoleren en waarbij in die periode een intensieve beluchting van het sediment wordt gerealiseerd (zie ook hoofdstuk 5).

Het ontbreken van voldoende elektronenacceptoren (zuurstof) is in de praktijk een van de belangrijkste belemmerende factoren voor de snelheid van het aërobe afbraakproces. Een nieuwe ontwikkeling is, dat er zouten op de markt zijn gekomen (oxygen release compounds; kort weg genoemd: ORC's) [10], die langzaam in water oplossen, waarbij tijdens dit proces zuurstof vrijkomt. Deze ORC's kunnen worden ingegraven op strategische plaatsen in de (water)bodem (bijvoorbeeld in combinatie met kleischermen), of aan capping-materiaal worden toegevoegd (zie ook 4.5).

Tabel 2: *Overzicht van methoden en technologieën die relevant zijn voor de in-situ aanpak van verontreinigde waterbodems*

Type aanpak	Werkingsgebied contaminanten	Technologisch concept	Technologische invulling	Beoordeling haalbaarheid Kosteneffectiviteit ¹	Effecten op omgeving ²
Stimuleren van microbiologische afbraak	Organisch (PAK, olie, e.a.)	Afbraaksnelheid verhogen door toevoegen van elektronenacceptoren	Injectie van zuurstof als elektronenacceptor	-	-
			Omwoelen (bijv. met turbinejets)	-/+	-
			Toevoegen van nitraat als elektronenacceptor	-	-/+
			Toevoegen van humus als elektronenacceptor	-/+	+
			Toepassen van bioschermen of andere reactieve zones, eventueel gecombineerd met elektrokinetisch transport	-/+	+
			Toevoeging van speciaal gekweekte organismen	-	+
			Toevoeging van entstof	-/+	-/+
			Toevoeging van nutriënten	-	-
			Afbraak van contaminanten in grond rond de wortelzone door beplanting	+	+
			Tijdelijk droogleggen van rivierarmen of havens	-/+	0
Stimuleren van microbiologische reductieve dechlorering	Gechloroerde Organische verbindingen	Processnelheid verhogen door wijzigen van milieuecondities	Toepassen van microbiële matten	-/+	+
			Toevoegen van elektronendonoren aan capping lagen, kleischermen, e.d.	-/+	+
			Aanbrengen van beplanting; daarna oogsten en verbranden	-/+	+
Stimuleren van biologische concentrering en verwijdering	Metalen (vooral Ni en Zn, daarnaast ook Cu en Cd) Fosfaten	Opname van metalen in planten (phyto-extractie) Opname van fosfaten in planten (phyto-extractie)	Aanbrengen van beplanting (en oogsten)	-/+	+

Type aanpak	Werkinggebied contaminanten	Technologisch concept	Technologische invulling	Beoordeling haalbaarheid		
				Kosteneffectiviteit ¹	Effecten op omgeving ²	
Toepassen van chemische omzetting	Alle, mits oxideerbaar of reduceerbaar	Chemische oxidatie/reductie van contaminanten	Toevoegen van oxidatiemiddelen (bijv. H ₂ O ₂)	-	-	
			Elektrokinetische remediatie	-	-	
Vastleggen van verontreinigende stoffen (sorptie/immobilisatie)	Metalen	Precipitatie van metalen als sulfide	Toelaten van zoute kwel (sulfaathoudend water)	+	0	
			Aanleggen van wet-lands (moerasachtige zones)	-/+	+	
	Metalen	Precipitatie van metalen als hydroxide of minder goed oplosbaar complex	Verhogen van de pH door toevoegen van kalk of andere hydroxiden	-/+	-/+	
			Binding van metalen in anorganische matrix	Precipitatie/adsorptie bij/aan plantenwortels (phytostabilisatie)	+	+
	Organisch	Adsorptie van metalen aan klei, of aluminiumsilicaten		Toevoegen van cement (puzzolanen) en eventuele additieven	-/+	+
				Vitrificatie m.b.v. elektrische stroom	-	-
				Aanbrengen van een kleischerm (evt. met zeolieten, of beringiet)	-/+	+
				Aanbrengen van een capping laag	-/+	0
	Fosfaat	Precipitatie van fosfaat als ijzerfosfaat		Toevoegen van "adsorptieknikkers"	-/+	+
				Aanbrengen van beplanting	-/+	+
			Aanbrengen van een kleischerm, eventueel met toevoeging van organische stof en/of ORC's	-/+	+	
			Aanbrengen van een capping laag met klei, of compost, evt. met ORC's	-/+	0	
		Toevoegen van "adsorptieknikkers"	-/+	+		
		Aanbrengen van beplanting	-/+	+		
		Injectie van ijzerchloride of ijzersulfaat	-	-		

-- zie vervolg --

Type aanpak	Werkingsgebied contaminanten	Technologisch concept	Technologische invulling	Beoordeling haalbaarheid Kosteneffectiviteit ¹	Effecten op omgeving ²
Beperken van advectieve verspreiding naar het oppervlaktewater	Alle	Verhogen van de hydraulische weerstand	Aanbrengen van een schone kleilaag, of een andere afdekkende toplaag	+	0
		Vermindering van watererosie	Verdichten van de sedimentlaag (trillen)	-/+	0
		Stromingstechnische isolatie	Aanbrengen van beplanting	+	+
Beperken van advectieve verspreiding naar het grondwater	Alle	Verhogen van de hydraulische weerstand	Omleggen van rivieren/beken	+	0
		Hydrologische isolatie	Aanbrengen van een kleischerm, eventueel met toevoeging van organische stof en/of ORC's	+	+
Niet ingrijpen	Alle	Beperken van risico's	Peilbeheersingsmaatregelen	+	0
			Functie van de locatie wijzigen	+	0

1) Met de symbolen (-, -/+, +) wordt een kwalitatieve beoordeling gegeven van relatief ongunstig tot relatief gunstig; 0 = geen beoordeling mogelijk (bijvoorbeeld omdat het oordeel afhankelijk is van specifieke omstandigheden)

2) Met de symbolen (-, -/+, +) wordt een kwalitatieve beoordeling gegeven van belangrijk negatief effect tot geen effect; 0 = geen beoordeling mogelijk (bijv. omdat het oordeel afhankelijk is van specifieke omstandigheden)

Een interessant gegeven is ook, dat humusverbindingen kunnen fungeren als elektronenacceptor bij anaërobe afbraakreacties [14]. Humusverbindingen kunnen daarnaast een mobiliserende werking hebben en als koolstofbron fungeren in cometabolische processen [16]. Wellicht is het derhalve mogelijk de anaërobe processen te versnellen door het toevoegen van de juiste humusverbindingen.

In sommige gevallen kan de aanwezigheid van toxische componenten (bepaalde zware metalen) remmend werken op de activiteit van de micro-organismen. Een remedie hiervoor zou kunnen zijn het wijzigen van de milieucondities (beperking van de mobiliteit van de metalen), of het verwijderen van deze metalen. Bij deze laatste optie (het in-situ verwijderen van toxische zware metalen) lijken de mogelijkheden bij verontreinigde waterbodems beperkt tot het toepassen van fyto-remediatie (zie hierna).

De aërobe biologische afbraak van organische contaminanten kan worden geëffectueerd in de wortelzone van gewassen, zoals riet, waarbij het gewas zelfs onder natte omstandigheden een positief effect heeft op de aërobie van de waterbodem. Het laten groeien van deze gewassen met als doel de afbraak van verontreinigende stoffen kan worden gecombineerd met natuurontwikkeling. Het gewas kan wellicht na het oogsten worden gebruikt voor energiewinning [9]. Aandachtspunten zijn het laten aanslaan en de groeiomstandigheden van deze gewassen.

Een andere mogelijk interessante manier om aërobe biologische afbraak te stimuleren, is het aanbrengen van variaties in het waterniveau en het creëren van geschikte stromingscondities. Een kanttekening die hierbij moet worden geplaatst, is dat waterbodems in het algemeen een (min of meer) oxische toplaag hebben bovenop een pakket anoxische specie. De dikte van de oxische toplaag is afhankelijk van de condities, zoals wind- en stromingscondities en van de mate van bioturbatie. De aërobe biologische afbraakprocessen spelen zich derhalve voornamelijk af in de toplaag, de overgangszone tussen waterbodem en water. Juist in deze overgangszone bevinden zich veel organismen, zodat van eventuele ingrepen goed de ecologische gevolgen zullen moeten worden nagegaan.

4.2 Stimuleren van biologische concentrering en verwijdering

Deze optie (phyto-extractie) is toepasbaar voor specifieke zware metalen, zoals nikkel, zink, koper en cadmium. Deze metalen kunnen in hyperaccumulerende planten worden opgeslagen, waarna de planten worden geoogst en verbrand. Bij de verbranding worden de metalen geconcentreerd in de as.

Deze planten zijn zoals genoemd metaalspecifiek en kennen een langzame groei.

4.3 Stimuleren van reductieve dechlorering en verdere afbraak

Voor waterbodems met een relatief klein oppervlak zijn maatregelen voorstelbaar, die de afbraak van gechloreerde verbindingen bevorderen. Hierbij kan worden gedacht aan een situatie waarbij baggerspecie tijdelijk in een depot wordt bewaard. In dat geval kunnen de omstandigheden vrij eenvoudig worden gemanipuleerd.

Ook kan worden gedacht aan het (tijdelijk) hydrologisch isoleren van rivierarmen, of het tijdelijk afsluiten van havens. In dit soort gevallen zijn maatregelen denkbaar, als:

- droogleggen van de waterbodem om oxische condities voor de aërobe afbraak te verkrijgen na de daaraan voorafgaande anoxische condities voor de reductieve dechlorering;
- het toepassen van microbiële matten in ondiepe wateren;
- het toevoegen van elektronendonoren en koolstofbronnen aan afsluitende lagen (capping-lagen, kleischermen).

De eerst genoemde optie kan voor regionale wateren belangrijk zijn. De in de zomer droogvallende slootbodems zijn situaties die hierop lijken.

4.4 Vastleggen van verontreinigende stoffen (sorptie/immobilisatie)

Mogelijke opties zijn:

- koude immobilisatie (o.a. door fysische opsluiting) van verontreinigende stoffen, door toevoegen van kalk, cement, of aluminiumsilicaten (zeolieten, beringiet) aan de waterbodem en deze zo nodig tijdelijk droog te leggen;
- warme immobilisatie (vitrificatie) met behulp van elektrische stroom;
- neerslaan van metalen als sulfide (bijv. door het toelaten van zoute kwel);
- neerslag of adsorptie van metalen bij of aan plantenwortels (phytostabilisatie);
- absorptie van organische verontreinigende stoffen in organische stof (compost);
- adsorptie van metalen of van organische verontreinigingen aan compost, klei, of aluminiumsilicaten (zeolieten, beringiet), bijvoorbeeld in de vorm van kleischermen of aan later weer te verwijderen “adsorptieknikers”;
- neerslaan van fosfaat als onoplosbaar zout (bijv. ijzerfosfaat).

4.5 Beperken van advectieve verspreiding naar grond- of oppervlaktewater

Mogelijke opties om verspreiding naar het oppervlaktewater te beperken, zijn:

- Verhoging van de hydraulische weerstand door capping, eventueel onder toevoeging van ORC's (zie 4.1); het capping-materiaal kan tevens als adsorbens voor verontreinigende stoffen dienen;

- Verdichten van de sedimentlaag (bijvoorbeeld door trilnaalden);
- Stromingstechnische isolatie (omleggen van rivieren/beken);
- Vermindering van de watererosie door beplanting.

Beide eerstgenoemde opties zijn ook effectief voor beperking van de verspreiding naar het grondwater. Andere opties met dit oogmerk zijn:

- Verhoging van de hydraulische weerstand door middel van kleischermen (eventueel gecombineerd met ORC's (zie 4.1);
- Opheffen van inzijgcondities door hydrologische isolatie (peilbeheersingsmaatregelen).

4.6 Niet ingrijpen

Deze optie kan in sommige gevallen uit het oogpunt van beperking van actuele risico's de meest wenselijke zijn. Daarbij kan de mogelijkheid worden overwogen om de functie van de locatie te wijzigen (zie ook 3.11).

5 Praktische betekenis van in-situ concepten

Indien niet de verontreinigde baggerspecie c.q. de verontreinigde waterbodem, maar het gebied waarin de verontreinigde waterbodem is gelegen als invalshoek wordt gekozen, dan ligt het voor de hand het probleem meer te benaderen vanuit de functies die het watersysteem vervult. De verontreinigde waterbodem kan of zal een negatief effect hebben op het vervullen van die functies of een bedreiging vormen voor eventuele nevenfuncties.

In dit hoofdstuk worden mogelijkheden geschetst om omgevingsfactoren te veranderen of te beïnvloeden zonder dat daarbij de primaire functie van het watersysteem wordt aangetast, maar waarbij, inhakend op het gestelde in paragraaf 2.6, de benodigde condities voor een in-situ aanpak worden gecreëerd of de bestaande condities reeds een in-situ oplossing inhouden.

Onderscheid wordt gemaakt in “droge”, “natte” en “geborgten” waterbodems volgens de indeling van bijlage 2.

Voor “droge” waterbodems (uiterwaarden en oevers) kan een onderverdeling in subcategorieën wenselijk zijn in de vorm van een overstromingskans en -duur per jaar naast de gebruikelijke onderverdeling voor in-situ sanering vanuit de landbodems.

Voor de “natte” waterbodems is het belangrijk hoe de waterbodem ten opzichte van de ruimtelijke omgeving is gesitueerd. Dit leidt tot het volgende onderscheid:

- gelegen in niet beheersbaar stromend water:
 - rivieren; zeer dynamisch en gekenmerkt door sedimentatie, sedimentatietransport, erosie, aanvoer van verontreinigende stoffen van buitenaf, puntbronnen, lozingen, *etc.*;
 - beken; periodiek zeer dynamisch in regenrijke perioden;
- gelegen in periodiek stromend water:
 - strangen;
 - nevengeulen;
 - bochtafsnijdingen;
 - vooroevers van rivieren (niet vallend binnen het stromende deel);
- gelegen in regelbaar stromend water:
 - kanalen/vaarten;
 - boezemwateren;
 - uitwaterings- en spuislotten;
 - stadsgrachten;
- gelegen in stilstaand water:
 - vijvers;
 - singels;
 - plassen (Loosdrecht, Vinkeveen, e.a.);
 - scheidingsloten.

5.1 “Droge” waterbodems

De uiterwaarden van de grote rivieren hebben recentelijk vaak in de schijnwerpers van de belangstelling gestaan. Enerzijds wordt de maatschappelijke waarde van deze (natuur)gebieden steeds meer onderkend, terwijl daarnaast op ruime schaal erkend wordt, dat in het verruimen van het winterbed zeer goede mogelijkheden aanwezig zijn om zonder verdere dijkverhogingen een duurzame bescherming tegen overstroming te realiseren. De vierde nota Waterhuishouding zet sterk in op het koppelen van beide waarden c.q. belangen. Hiervoor is grootschalig grondverzet een vereiste. Het verruimen van het winterbed en daarmee het grootschalige grondverzet betreft onder andere:

- het baggeren van het sediment uit het zomerbed;
- het verwijderen van zomerkaden;
- het aanleggen van nevengeulen;
- het verlagen van de uiterwaarden;
- het verlagen van de rivierkribben;
- het verwijderen van obstakels;
- dijkverlegging;
- het aanleggen van retentiebekkens.

Met name bij het verlagen van de uiterwaarden komen zeer grote hoeveelheden verontreinigde grond vrij (klasse 4 specie). De verontreinigende stoffen (zink, maar ook koper en arseen) zijn vooral aanwezig in de bovenste halve meter.

In de beleidsnotitie “Actief bodembeheer rivierbed” wordt ruimte gecreëerd voor toepassing van deze verontreinigde uiterwaardengrond binnen het gebied. Hierbij moet worden gedacht aan het verplaatsen van dit materiaal binnen een project, het benutten ervan als bouwstof, de toepassing in werken en de berging in bestaande diepe zandwinputten voor zover in het gebied aanwezig.

Een stimulans ter verbetering van de milieuhygiënische kwaliteit van dit vrijkomende en her te gebruiken materiaal bevat de notitie echter niet.

Toch zijn er mogelijkheden denkbaar om voor een deel van deze alleen met zware metalen verontreinigde grond de milieurisico's te verminderen. Dit kan bijvoorbeeld door het materiaal in een gereduceerd milieu te brengen, waarbij de metalen complexen met sulfiden vormen en neerslaan. Gedacht kan worden aan plaatsen als:

- zandwinputten;
- kombergingen;
- nevengeulen;
- kribben, aan te leggen als nieuwe geleidesysteem in het zomerbed na verbreding en verdieping van dit bed.

Ook kan worden gezocht naar mogelijkheden van beplanting van de verontreinigde bodem na toepassing van het materiaal waarbij neerslag of adsorptie van de zware metalen bij of aan de plantenwortels plaatsvindt (zie ook 4.4).

Voor het vrijkomende sediment uit het zomerbed (baggerspecie) kan worden onderzocht, of de fysische en chemische eigenschappen zodanig te verbeteren zijn, dat duurzame toepassing binnen het winterbed mogelijk wordt. Dit is dan echter niet meer te classificeren als een in-situ aanpak.

Voor een algemene beeldvorming wordt echter toch vermeld, dat daarbij kan worden gedacht aan bepaalde vormen van koude immobilisatie waarbij geen cementerende stoffen worden gebruikt, maar waarbij wel een “aardachtig” materiaal wordt opgeleverd. De doorlatendheid wordt in deze gevallen verminderd door toepassing van oppervlakteactieve stoffen (Consolid) en/of door toevoeging van bijvoorbeeld een kleimineraal (Ton-erde), waardoor de binding van verontreinigende stoffen zal toenemen.

Voor koude immobilisatie door middel van cementering wordt momenteel onderzoek gedaan naar stoffen die ook de organische componenten kunnen vastleggen, zoals actieve kool.

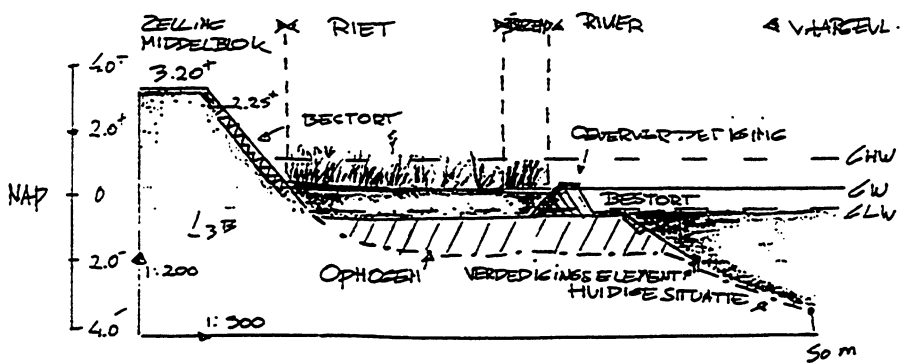
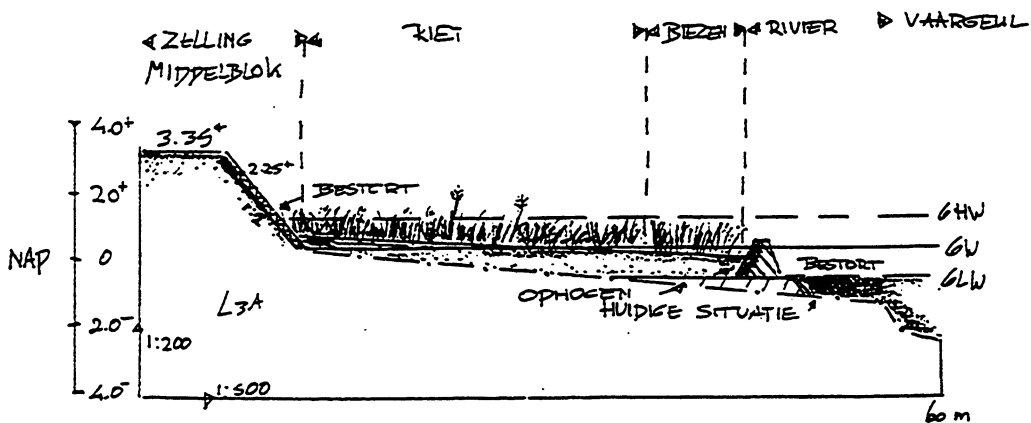
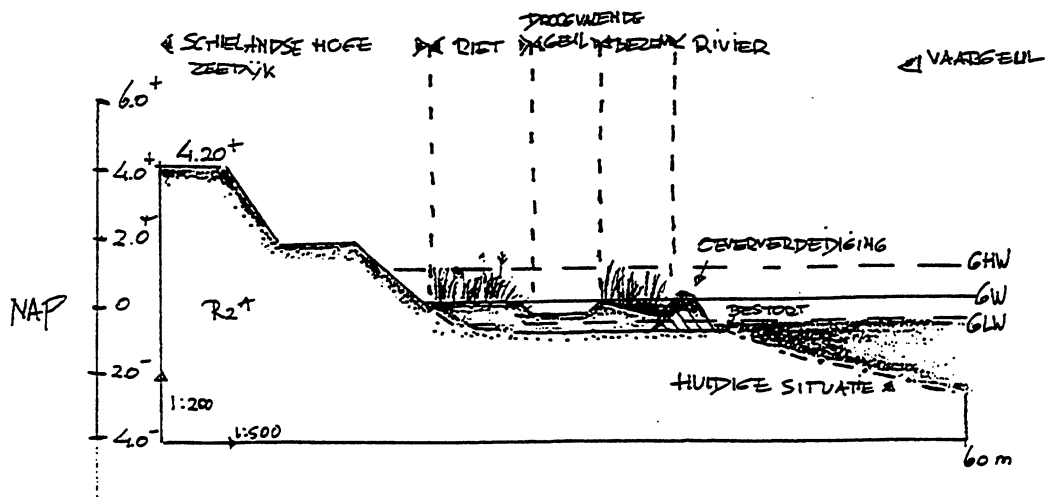
Ook is recent een Duits concept op de markt geïntroduceerd, waarbij door toevoeging van een natuurlijk kleimineraal (kaoliniet) en een geringe hoeveelheid kalk of cement de kwaliteit van baggerspecie wordt verbeterd. Praktijkgegevens zijn echter nog maar zeer beperkt aanwezig.

5.2 “Natte” waterbodems

Voor verontreinigde waterbodems, gelegen in *niet beheersbaar stromend water* zoals rivieren zijn weinig mogelijkheden aanwezig om omgevingsfactoren zodanig te wijzigen, dat daardoor betere condities ontstaan voor een in-situ aanpak.

Door sedimentatie, sedimenttransport, erosie, *etc.*, worden de waterbodem en de daarin aanwezige verontreinigende stoffen regelmatig verstoord. Bij voldoende waterdiepte in de rivier zijn mogelijkheden aanwezig om de waterbodem af te dekken met schoner materiaal. Ook kan theoretisch worden gedacht aan het creëren van een “gestuurd” voortschrijdend sedimentatiefront in de rivier, waarbij ernaar wordt gestreefd om op gecontroleerde wijze sedimentatie te laten plaatsvinden van “schoon” zwevend stof op de verontreinigde waterbodem.

Met het afdekken (capping) zijn positieve ervaringen opgedaan in het IJ-meer gebied ter hoogte van de Diemerzeedijk. Hier is de verontreinigde waterbodem voorzien van een in den natte aangebracht folie en afgedekt met zand. Mede onder invloed van sedimentatie van zwevend stof is enkele jaren na realisatie in de afdeklaag een goed waterbodemmilieu aan het ontstaan. Een andere locatie met capping betreft een proef, uitgevoerd in de Nieuwe Merwede. Aan deze proef is een monitoringprogramma gekoppeld voor een periode van vijf jaar. Resultaten zijn nog niet beschikbaar. Ook op de waterbodem van de Sassenheimervaart is een “leeflaag” aangebracht nadat tijdens de saneringsuitvoering



Figuur 2: Oeverplan Hollandsche IJssel - Witteveen en Bos; dwarsdoorsnede.
 Toelichting: Schetsmatige dwarsdoorsneden voor verschillende situaties langs de Hollandsche IJssel, waarbij een natuurvriendelijke oeverontwikkeling gecombineerd zou kunnen worden met een in-situ sanering van verontreinigingen zonder ingrijpende, eco-systeem versturende baggerwerkzaamheden.

bleek, dat het verontreinigde waterbodemmateriaal niet conform de saneringsdoelstelling kon worden verwijderd.

In geval van capping kan ook worden gedacht aan de toevoeging van zouten aan het capping-materiaal waarbij tijdens het in oplossing gaan zuurstof vrijkomt ter bevordering van een eventueel gewenste aërobe afbraak.

In beeksystemen kunnen mogelijk oude lopen weer worden hersteld, passend binnen natuurontwikkelingsprojecten, waarbij de “huidige” verontreinigde loop van het systeem wordt afgesloten maar wel in stand gehouden. Na deze afsluiting kunnen door waterstandsverlaging, al dan niet met het aanbrengen van beluchtingselementen, het aanbrengen van specifieke vegetatie, of toevoegen van humusverbindingen die als elektronenacceptor fungeren bij anaërobe afbraakreacties en dergelijke, condities worden gecreëerd voor biologische reiniging op termijn, adsorptie, immobilisatie of precipitatie.

Voor waterbodems gelegen in *periodiek stromend water* bestaan meer mogelijkheden om de condities voor een in-situ aanpak te verbeteren.

Bij vooroevers van rivieren kunnen in combinatie met het creëren van natuurontwikkeling zones worden aangelegd die afhankelijk van het type verontreiniging in de voorwaarden voor afbraak of fixatie voorzien.

Bij de integrale sanering van de Hollandsche IJssel bijvoorbeeld, is voorzien in het baggeren van het verontreinigde waterbodemmateriaal ter plaatse van de oude zellingen en vooroevers. Daarnaast wordt gedacht aan de aanleg van natuurvriendelijke oevers. Nagegaan zou kunnen worden of de aanpak van de verontreinigingen zodanig kan worden geïntegreerd met de aanleg van natuurvriendelijke oevers en vooroevers, dat kan worden afgezien van het baggeren van het verontreinigde materiaal. Op deze wijze kan langs natuurlijke weg een kwaliteitsverbetering in gang worden gezet zonder het totale aquatische ecosysteem door de wijze van uitvoering ernstig aan te tasten. Ook hier kan weer worden gedacht aan het creëren van zones met een bepaald type vegetatie, ademend met afwisselend wel en geen water en zodanig aangelegd dat het verontreinigde materiaal niet in de vaargeul kan komen. Een optie is om dit “ademen” te reguleren met speciale, op natuurlijke wijze werkende beluchtingselementen op of in de waterbodem onder invloed van de getijdebeweging van de Hollandsche IJssel. Het voorgestelde principe is weergegeven in figuur 2. Het is denkbaar een dergelijk systeem c.q. een dergelijke situatie eveneens te creëren tussen kribvakken in de grote rivieren.

Strangen en nevengeulen van grote rivieren bieden bij uitstek mogelijkheden om in de zomerperiode de waterstanden zodanig te variëren dat de condities voor een in-situ aanpak daardoor verbeteren. Theoretisch kan worden gedacht aan een zodanige verlaging van de waterstand dat een optimaal milieu voor waterminnende planten wordt gecreëerd die de afbraak van verontreinigende stoffen bevorderen. Ook kan worden gedacht aan een seizoensafhankelijke drooglegging en een behandeling van de top laag van de betreffende waterbodem (sorptie en/of immobilisatie).

Een andere mogelijkheid is het ingraven in de waterbodem van oxygen release compounds (ORC's) die langzaam in water oplossen en waarbij zuurstof vrijkomt.

Theoretisch zou ook kunnen worden gedacht aan het verbreden van strangen en nevengeulen in combinatie met het verondiepen ervan, door het afdekken van de verontreinigde waterbodem met schone, slecht doorlatende grond. In de onderliggende sedimentatielaag kan een "behandelingssysteem" (bijvoorbeeld microbiële matten) worden aangelegd.

Voor waterbodems gelegen in *stilstaand water* die dienen als opvangbuffer en afvoersysteem voor overtollige neerslag zijn theoretisch mogelijkheden aanwezig die uitgaan van het buiten gebruik stellen van deze functie door bijvoorbeeld omlegging (sloten) of het tijdelijk op een andere wijze voorzien in de betreffende functie.

Ook dan bestaan mogelijkheden voor het geheel of gedeeltelijk droogzetten van de betreffende waterloop indien dit vanuit het creëren van geschikte omstandigheden nodig is.

In relatief kleine waterlopen zouden adsorptieve barrières kunnen worden ingebouwd, bijvoorbeeld door het toevoegen van "knikkers" aan watersystemen die op termijn in het kader van onderhoud (5 à 10 jaar) moeten worden uitgebaggerd. Deze knikkers zouden dan op eenvoudige wijze on site moeten kunnen worden gescheiden van de baggerspecie, die vervolgens in het gebied direct weer kan worden toegepast. In kleine waterlopen zijn ook meer mogelijkheden aanwezig om beluchtingselementen in te bouwen, indien deze waterbodem met de bovenstaande waterkolom hydrologisch (tijdelijk) is te isoleren van de omgeving.

Voor watersystemen waar ook op termijn onderhoudsbaggerwerk niet aan de orde is, zouden adsorptieve barrières in de vorm van blokken of platen kunnen worden ingebouwd op een zodanige wijze, dat deze makkelijk te vervangen c.q. te "verversen" zijn.

Een andere optie is om in de genoemde platen of blokken sparingen te maken voor een beluchting en desgewenst voor de periodieke aanvoer van nutriënten, als dit voor de afbraak van verontreinigende stoffen nodig is. Strikt theoretisch zou zelfs een fijnmazige, kunststof wapening kunnen worden overwogen waarbij de strengen van dit net bestaan uit buisjes met gaatjes op microschaal, waardoor zuurstof of de voor de afbraak benodigde stoffen op alle plaatsen binnen het compartiment waar dit systeem is aangelegd, kunnen worden aangevoerd. Door segmentering binnen een compartiment zou nog verdere sturing mogelijk zijn. Dit kunststof net zou theoretisch ook kunnen worden gebruikt voor kalktoevoer en/of pH-beïnvloeding om een vastlegging van stoffen te bewerkstelligen.

Door de genoemde blokken of de wapening kan mogelijk zelfs een elektrische stroom worden gevoerd die zich manifesteert in microtrillingen waarmee de consolidatie in-situ kan worden bevorderd. Doel: een betere vastlegging van verontreinigende stoffen en indikking van de sliblaag, waarmee onderhoudsbaggerswerk kan worden uitgesteld of voorkomen.

5.3 “Geborgen” waterbodems

Reiniging in depot kan met name van belang zijn voor de aanpak van baggerspecie die verontreinigd is met gechloreerde organische stoffen, zoals HCB en PCB's. In POSW-verband zijn onderzoeken uitgevoerd met in depot aanwezige specie uit het Zeehavenkanaal te Delfzijl.

Het idee van reinigen in depot is ontstaan uit de twee-staps afbraak waarmee in principe gechloreerde verbindingen tot onschadelijke verbindingen kunnen worden gemineraliseerd. Bij de eerste stap mag geen zuurstof aanwezig zijn. Onder anoxische omstandigheden verwijderen bacteriën chlooratomen uit de moleculen. Daardoor ontstaan lager gechloreerde tussenproducten, die in een aëroob proces door bacteriën verder kunnen worden afgebroken. De tweede afbraakfase kan pas beginnen in aanwezigheid van zuurstof, dus na ontwatering van het depot.

Het concept van reinigen in depot is door het RIZA als perspectiefvol omschreven, maar heeft zeker nog nader onderzoek. Het is een extensief proces waarbij voor de duur van de eerste fase, de zuurstofloze periode in het natte depot, termijnen gelden van 5 tot 10 jaar. Voor de tweede fase worden termijnen genoemd tot meer dan 5 jaar, zodat de totaal benodigde tijd zeker 15 jaar kan bedragen. Dit concept zou ook kunnen worden doorvertaald naar “open” systemen, bijvoorbeeld regionale wateren, waarbij de mogelijkheid aanwezig is om oxische condities te creëren.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

In de probleembeschrijving in hoofdstuk 2 is geconcludeerd dat voor "natte" waterbodems geldt, dat de daarin aanwezige verontreinigende stoffen, wat betreft soort, zeer divers zijn en dat deze stoffen tevens in een bijzonder "milieu" verkeren. In bijlage 2 is dit nader toegelicht.

Uit deze bijlage kan worden afgeleid dat van de klasse 3 en 4 species, in de cocktail aan verontreinigende stoffen, de anorganische microverontreinigingen voor 80% bepalend zijn voor de klasse indeling. Voor 10% van deze species zijn de niet gechloreerde organische microverontreinigingen bepalend en eveneens voor 10% de gechloreerde verbindingen.

Dit is te verklaren uit de wijze waarop de stoffen in de waterbodem terecht kunnen komen en de mogelijke bindingsvormen aan of in de bodemmatrix.

Het komt in de praktijk weinig voor dat stoffen zonder binding (als discrete deeltjes) in de waterbodem aanwezig zijn. Verkleving en adsorptie aan het oppervlak van de bodembestanddelen komen ook veel minder voor dan bij terrestrische bodems. Verontreinigende stoffen kunnen wel geadsorbeerd zijn aan het oppervlak van de poriën of zijn ingebouwd in de bodembestanddelen. Ook kunnen stoffen chemisch of kristallijn gebonden zijn. Bij de laatst genoemde bindingsvormen is door de zeer slechte biobeschikbaarheid van de verontreinigingen biologische reiniging niet mogelijk.

De geringe biobeschikbaarheid van stoffen houdt tevens in dat de risico's voor het aquatische ecosysteem en/of verspreiding ook in geval van relatief hoge gehalten aan stoffen in de bodem beperkt kunnen zijn.

Voor waterbodems geldt, mogelijk nog sterker dan voor landbodems (zie ook 2.6), dat onderzoek noodzakelijk is naar de risico's van de aanwezigheid van verontreinigende stoffen en dat eventuele maatregelen (in aard, omvang en tijd) moeten worden afgestemd op deze risico's.

Mede vanuit de ervaringen met in-situ sanering van landbodems (par. 2.4) en de ontwikkelingen in het bodemsaneringsbeleid (par. 2.5) is het verkrijgen van een duidelijk beeld van de mate waarin bepaalde in-situ maatregelen of in-situ saneringsconcepten een bijdrage kunnen leveren aan de na te streven risicoreductie en van de termijn waarop zeer belangrijk. Dit geldt ook voor een eventueel tijdelijk verhoogd risico voor het ecosysteem in het oppervlaktewater als gevolg van het ontstaan van neveneffecten van afbraakprocessen en de eventuele acceptatie ervan.

Voor welke waterbodems vormt een in-situ aanpak een alternatief?

De eerste vraag van deze studie kan op basis van het voorgaande beter worden veranderd in: "In welke situaties vormt een in-situ aanpak een alternatief?" Het blijkt dat meerdere situaties kunnen worden geschetst waar beelden van een in-situ aanpak tot leven kunnen worden gebracht. Het gaat dan met name om situaties waarbij andere, meer conventionele aanpakken minder gewenst of niet doelmatig zijn en waarbij in geval van baggeren grote schade wordt toegebracht aan aanwezige (natuur)waarden. Bestaande of daarmee nieuw geïntroduceerde kortetermijn-risico's dienen dan wel acceptabel te zijn.

Welke bodemsaneringsconcepten zijn toepasbaar voor waterbodems?

Over deze vraag het volgende: Op basis van de voorgaande beschouwingen kan worden geconcludeerd dat de mogelijkheden om de snelheid van aërobe afbraakprocessen in waterbodems in-situ te verhogen, beperkt zijn. Zoals besproken is het echter belangrijk om vast te stellen wanneer een versnelling van het afbraakproces gezien de actuele risico's ook echt noodzakelijk is. Vaak zal sprake zijn van potentiële risico's en is het volledig opheffen daarvan op korte termijn niet of slechts beperkt waar te maken.

Voor kleine watersystemen zijn er in de toekomst wellicht mogelijkheden om te werken met beluchtingssystemen of alternatieve oxidatiemiddelen om te kunnen voldoen aan de zuurstofvraag voor biologische afbraak.

Nieuwe ontwikkelingen zijn de "oxygen release compounds" - ook wel genoemd ORC's - die langzaam in water oplossen, waarbij tijdens het proces zuurstof vrijkomt. Deze ORC's kunnen op strategische plaatsen in de waterbodem worden ingegraven.

Een interessante en perspectiefvolle optie is ook het toedienen van bepaalde humusverbindingen waarmee het mogelijk is anaërobe processen te versnellen. Ook het toepassen van "microbiële matten", waarin oxische en anoxische zones voorkomen, kunnen in "open" situaties tot de mogelijkheden behoren.

In (zeer) ondiepe wateren kan de aërobe biologische afbraak van organische stoffen ook worden geëffectueerd in de wortelzone van gewassen en mogelijk ook door het aanbrengen van variaties in het watermilieu en door het creëren van geschikte stromingscondities.

Mogelijkheden voor reductieve dechlorering en verdere afbraak zijn met name aanwezig, indien de verontreinigde specie onder geconditioneerde omstandigheden in een depot aanwezig is. Ook kunnen mogelijkheden aanwezig zijn om de gewenste omstandigheden te creëren door het betreffende watersysteem (tijdelijk) te isoleren van de omgeving.

Voor het vastleggen van verontreinigende stoffen (sorptie/immobilisatie) lijken op termijn ook zeker mogelijkheden aanwezig te zijn. Voor zowel zware metalen als organische verbindingen valt te denken aan kleischermen of kleilagen waaraan toeslagstoffen zijn toegevoegd. Voor zware metalen is phytostabilisatie een mogelijke optie.

Capping biedt mogelijkheden voor zowel het vastleggen van verontreinigende stoffen in of aan de capping-laag als voor het beperken van de advectieve verspreiding van stoffen naar het oppervlaktewater en naar het grondwater. Aan deze capping-laag, die uit klei kan bestaan, kunnen organische stof en/of de genoemde ORC's worden toegevoegd.

Of bovengenoemde concepten ook praktisch toepasbaar zijn, kan niet worden aangegeven. Het gaat om beelden die zijn verkregen van theoretische mogelijkheden, die van betekenis kunnen zijn in specifieke situaties.

Wat is nu eigenlijk bekend over in-situ sanering?

Deze vraag staat in directe relatie met de voorgaande. Gebleken is dat afgezien van bio-preparaten en capping in de praktijk (nog) geen of slechts zeer incidenteel ervaring is opgedaan met in-situ sanering.

Het aanwezige oppervlaktewater en de mogelijke effecten van een in-situ aanpak op dit watersysteem in relatie met het daarvoor geldende wettelijke kader (WVO) zijn, naast de technologische knelpunten, belangrijke remmende factoren op de ontwikkeling van dergelijke concepten.

Welke acties moeten worden ondernomen voor het ontwikkelen van perspectievolle concepten?

Een gedachtenomslag is in dit verband belangrijk. Vanuit een conventionele benadering zullen er ook in de toekomst maar weinig mogelijkheden aanwezig blijken te zijn. Een eerste stap zou kunnen zijn om praktijksituaties te identificeren waarvoor geldt dat sanering noodzakelijk is, maar waarbij baggeren op grote bezwaren stuit, bijvoorbeeld als gevolg van aanwezige bijzondere natuurwaarden.

In deze situaties zou de bereidheid om na te denken over alternatieve mogelijkheden, en om hiernaar vervolgens onderzoek te doen, groot kunnen zijn. Indien bepaalde opties dan inderdaad perspectiefvol blijken te zijn voor praktische toepassing, dan zou een vervolgstap een praktijkproef kunnen zijn.

Welke risico's bestaan er ten aanzien van de (grond)waterkwaliteit?

Deze onderzoeksvraag blijkt zeer moeilijk in zijn algemeenheid te beantwoorden te zijn en is ook afhankelijk van het gekozen concept of de methode. Naast feitelijke effecten die zouden kunnen optreden en mogelijk een (langetermijn-)risico inhouden, is er ook een groot aantal vooroordelen ten aanzien van in-situ watebodemsanering die terughoudendheid bij nieuwe benaderingen in de hand werken. Negatieve effecten zijn overigens in de praktijk, met de beperkte ervaring die er is (bio-preparaten), nog niet waargenomen.

6.2 Aanbevelingen

Met deze studie is getracht om beelden op te roepen van mogelijkheden voor in-situ waterbodemsanering. Een volgende stap zou beeldherkenning kunnen zijn. Voor beeldherkenning is het belangrijk om te beschikken over een aantal probleemgevallen uit de praktijk, waarvoor het de moeite waard is om ze op een alternatieve wijze te benaderen.

Aanbevolen wordt om de beeldherkenning te concretiseren in een te organiseren workshop waarin de resultaten van deze studie in de vorm van (toekomst)beelden worden gepresenteerd en de aanwezigen worden uitgedaagd praktijkgevallen aan te dragen. Deze zou kunnen plaatsvinden in het kader van het Kennisnetwerk Waterbodems en Baggerspecie in Nederland. Een alternatief is om dit binnen het netwerk in breder verband schriftelijk te doen.

Na selectie van de aangedragen praktijksituaties kunnen vervolgens enkele cases worden voorbereid en in de vorm van een probleemdefinitie worden uitgewerkt voor presentatie en behandeling in een te organiseren deskundigenpanel. Het resultaat daarvan moet zijn een heldere probleemanalyse met beschouwingen over mogelijkheden voor in-situ sanering en inzicht in de te verrichten inspanningen om zover te komen. Voor enkele bijzondere gevallen of situaties kan aan deze probleemanalyse een concreet programma van onderzoek worden gekoppeld voor nadere uitwerking.

Nagegaan dient te worden in welke mate een dergelijk programma dan kan worden ondersteund met onderzoekssubsidies, mogelijk vanuit het SKB of Rijkswaterstaat.

7 Geraadpleegde literatuur

1. RIZA, 1997. Eindrapport POSW-fase 2 (1992 - 1996), Lelystad
2. RIZA, 1998. Biologische technieken voor reiniging van baggerspecie; Basisrapport en Eindrapport van POSW - fase 2; juni/juli 1998, Lelystad
3. Anonymus, 1997. Recent Developments for In-Situ Treatment of Metal Contaminated Soils, US-EPA rapport 011059
4. Anonymus, 1998. *H₂O* 18 (31), p. 13-15
5. Renner, R., 1998. *Env. Sci. Technol.* 15 (32), p. 360A-362A
6. Caldwell, M.E., *et al.*, 1998. *Env. Sci. Technol.* 14 (32), p. 2191-2195
7. Anonymus, 1998. Nieuwsbrief Bodem 8 (6)
8. Harmsen, J, *et al.*, 1995. In: Contaminated Soil, W.J. van den Brink, R. Bosman, F. Arendt (eds.), 9. Kluwer Academic Publishers, p. 1241-1242
9. Duijn, R.P.N., 1998. in: Proc. Congres Aanpak van verontreinigde waterbodems, 9 oktober 1998
10. Norris, R.D., 1995. in: Applied bioremediation of petroleum hydrocarbons, R.E. Hinchee, J.A. Kittel and H.J. Reisinger (eds.), Battelle Press, p. 483 - 487
11. Beurskens, J.E.M., 1995. Microbial transformation of chlorinated aromatics in sediments, dissertatie Landbouwniversiteit Wageningen
12. RIZA-POSW, 1997. rapport 97.863
13. Cornelissen, G., 1998. *H₂O* 21 (31), p. 26-28
14. Lovley, D.R., *et al.*, 1996. *Nature* 382, p. 445-448
15. Coates, J.D., *et al.*, 1997. *Applied and Environmental Microbiology*, p. 3589-3593
16. Kördel, W, *et al.*, 1995. Contaminated Soil, W.J. van den Brink, R. Bosman, F. Arendt (eds.), 18. Kluwer Academic Publishers, p. 909-910
17. Van Meel, P.P.A., *et al.*, 1997. Proc. International Conference on Contaminated Sediments, Sept. 7- 11, Vol. II, p. 649-656
18. Mondelinge mededeling J. Gerritse (TNO-MEP)
19. Bender, J., *et al.*, Biological Unit Processes for Hazardous Waste Treatment, p. 299-309
20. Rijkswaterstaat, vierde nota voor de Waterhuishouding
21. Actief waterbodembeheer voor het rivierbed
22. NWRI publication In Situ Sediment Treatment technology

Bijlage 1: Overzicht geïnterviewde personen

dr. J.E.M. Beurskens	RIVM (voorheen)	Brede benadering (sedimentval, driehoeksmosselen natural attenuation, etc) en biologische concepten
dr. ir. T.N.P. Bosma	TNO -MEP	NOBIS ervaringen terristrische bodems
ing. J. Bouma	Consulmij	Achtergronden POSW proeven
ir. J. Dolman	Boskalis	Uitvoeringsperspectieven in-situ maatregelen
dr. M.M.A Ferdinandy	RIZA	Biotechnologische mogelijkheden
dhr. A. Fijma	Mateboer	Chemische omzetting met oxiderend gas
dr. ir. K.P. Groen	RIZA	Algemene aspecten vanuit belangen PGBO
drs. J. Harmsen	SC-DLO	Biologische afbraak en ecologische risico's
dr. J. Joziasse	TNO - MEP	Fysisch- chemische mogelijkheden
drs. S. Keuning	Bioclear	Dechlorering Delfzijl specie en het nieuwe denken over bodemsanering
ir. Lageman	Hak Milieu	Mogelijkheden voor electroreclamation
ir. P. Massink	Tauw milieu	Bestaande praktijkervaringen en ontwikkelingen
prof.dr.ir. W.H. Rulkens	WUR	Fysisch-chemische processen
ir. H. Vermeulen	NOBIS	Risico-benadering in relatie tot functie-eisen, specifieke NOBIS-ervaringen
ir. H. van der Weijer	RWS	Ervaringen/ontwikkelingen binnen actiefbodembeheer
drs. E. ten Winkel	Aqua Sens	Ecotoxicologische risico's

Bijlage 2: Aard en omvang waterbodempromblematiek

1 Categorie-indeling

Ten behoeve van het inzicht in de mogelijke betekenis van in-situ opties in relatie tot de omvang van de problematiek wordt een onderscheid gemaakt in categorieën waterbodems met een nadere onderverdeling en een karakterisatie van elke (sub)categorie.

Deze categorie-indeling wordt zodanig opgezet, dat deze ook een rol kan spelen bij het zoeken naar oplossingsrichtingen. Omgevingsfactoren spelen daarbij dus een belangrijke rol.

Als hoofdingeling wordt uitgegaan van:

1. “droge” waterbodems: uiterwaarden;
2. “natte” waterbodems: bodems onder oppervlaktewater;
3. “geborgen” waterbodems: opgeslagen baggerspecie in depots of binnen andersoortige inrichtingen.

ad 1

In de grote rivieren zijn met name vanuit het aspect bescherming tegen hoog water in de periode tot 2015 de volgende inrichtingsmaatregelen voorzien:

- de realisatie van de tweede tranche dijkversterkingen in 2000;
- het bewerkstelligen van een beperking van de noodzaak voor een nieuwe ronde dijkversterkingen door (rivierbed verruimende) maatregelen in het riviersysteem zelf;
- het uitvoeren van rivierbed verruimende maatregelen in de Zandmaas en de Grensmaas (gereed in 2015), alsmede in de Rijntakken (IJssel, Rijn, Waal);
- het doorvoeren van een versnelling van natuurontwikkeling in de uiterwaarden (7000 ha gerealiseerd tussen 2005 en 2010).

Dit betekent dat binnen een relatief korte periode op grootschalige wijze activiteiten in de uiterwaarden moeten worden uitgevoerd, waarbij bodemmateriaal zowel binnen als buiten het gebied “herbestemd” moet worden. Dit materiaal is veelal diffuus verontreinigd, waarbij een groot deel wordt ingedeeld in klasse 4 vanwege het gehalte aan zware metalen (met name zink).

Vooralsnog wordt uitgegaan van een onderverdeling van deze “droge” waterbodems in de volgende subcategorieën:

- gelegen boven de heersende grondwaterstand zonder verwijderingsnoodzaak vanuit de herinrichting van het gebied;
- gelegen boven de heersende grondwaterstand met een verwijderingsnoodzaak vanuit de herinrichting;
- gelegen onder de heersende grondwaterstand zonder verwijderingsnoodzaak;
- gelegen in werken vanuit de herinrichting van het gebied.

ad 2

Voor de “natte” waterbodems geldt eveneens, dat er sprake kan zijn van een verwijderingsnoodzaak vanuit het gebruik van het watersysteem. Dit betreft de zogenaamde onderhoudsspecie. Dit onderscheid wordt met het oog op de principiële mogelijkheden voor in-situ aanpak echter minder belangrijk geacht. Belangrijker kan zijn hoe de waterbodem ten opzichte van de ruimtelijke omgeving is gesitueerd. Dit leidt tot het volgende onderscheid:

- gelegen in niet beheersbaar stromend water:
 - rivieren (zeer dynamisch; gekenmerkt door sedimentatie, sedimenttransport, erosie, aanvoer van verontreinigende stoffen van buitenaf, puntbronnen, lozingen, etc.);
 - beken (periodiek zeer dynamisch in regenrijke perioden);

- gelegen in periodiek stromend water:
 - strangen;
 - nevengeulen;
 - oude bochtafsnijdingen;
 - vooroevers van rivieren (niet vallend binnen het stromende deel);
- gelegen in regelbaar stromend water:
 - kanalen/vaarten;
 - uitwaterings- en spuislotten;
 - stadsgrachten;
- gelegen in stilstaand water:
 - vijvers;
 - singels;
 - plassen (Loosdrecht, Vinkeveen,)
 - scheidingsloten.

ad 3

Ten aanzien van deze categorie kan een onderscheid zinvol zijn in:

- grootschalige stortplaatsen als Slufter, Ketelmeerdepot e.d.;
- opgevolde grindgaten of klei/zandputten;
- nieuw te maken regionale baggerbergingen in putten in de uiterwaarden;
- tijdelijke depots (doorgangsdepots).

2 Omvang van de waterbodemproblematiek

Het gebrek aan verwerkingsmogelijkheden tegen redelijke kosten en het ontbreken van depotruimte heeft op een aantal plaatsen geleid tot achterstallig onderhoud en uitstel van sanering. Hierdoor zijn met name in de regionale en lokale wateren de waterafvoer-, de scheepvaart- en recreatiefunctie en inrichtings- en herstelplannen in het gedrang gekomen. Ook worden milieuhygiënisch als ongewenst beschouwde situaties gecontinueerd met (risico's voor) aantasting van het aquatische ecosysteem als consequentie.

Vanuit deze achterstandssituatie is het recentelijk geschatte potentiële aanbod van baggerspecie voor de periode 1996-2015 in tabel 1 aangegeven. In vergelijking met de ENW blijkt, dat er veel meer aanbod wordt verwacht. De oorzaak ligt vooral in een betere inventarisatie van de onderhoudsspecie. Separaat zijn in deze tabel opgenomen de geschatte hoeveelheden verontreinigde baggerspecie die bij natuurontwikkeling of winterbedverlaging in de uiterwaarden van de grote rivieren zouden kunnen vrijkomen.

3 Type verontreinigingen per categorie

Uit literatuurgegevens kan geen beeld worden afgeleid van het type verontreiniging per categorie waterbodempodem zoals in paragraaf 1 van deze bijlage gegeven.

Wel kan op een meer algemeen niveau een indicatie van de verontreinigingssituatie worden gegeven met een onderscheid naar:

- organische microverontreinigingen (omive);
- gechloreerde organische microverontreinigingen (Cl-omive);
- anorganische microverontreinigingen (anomive);
- eutrofiërende stoffen (mave).

Het in tabel 2 geschetste beeld van typen verontreinigingen per categorie is afgeleid van gegevens uit de beleidsnotitie "Actief bodembeheer rivierbed" en "Eindrapport biologisch reinigen" van POSW.

Tabel 1: *Potentieel aanbod baggerspecie periode 1996-2015 (in miljoenen in-situ m³)*

	streefwaarde (kl 0/1)	grenswaarde (kl 2) ¹⁾	toetsingswaarde (kl 3)	interventiewaarde (kl 4)
“natte waterbodems”:				
- onderhoud				
. Rijk;	374	110	21	5
. regionaal	76	178	54	36
			<u>75</u>	<u>41</u>
- sanering				
. Rijk	-	-	32	43
. regionaal	-	-	8 ²⁾	4
			<u>40</u>	<u>47</u>
Totaal 940 (100%)	450 (48%)	288 (30%)	115 (12%)	88 (10%)
	“hergebruik”	“toepasbaar” (verspreiden)	“be- en verwerken”	
“droge waterbodems”				
- Oost Nederland (Waal, IJssel, Nederrijn,/Lek)	200 à 300 →		30 à 100	
- Zuid Nederland (Maas)	?		5 à 15	
- West Nederland (Zuid-Holland)	?		1 à 3	

¹⁾Voor zoute specie kl 2 geldt de strengere gehaltetoets in plaats van toetsingswaarde.

²⁾Betreft alleen kl 3 specie die bij sanering van een kl 4 specie wordt meegenomen in de sanering; werkelijke hoeveelheid kl 3 is veel groter.

Tabel 2: *Type verontreiniging per categorie, bepalend voor klasse-indelingen*

	omive*	Cl-omive*	anomive	mave
“droge waterbodems”				
- Waal, IJssel, Nederrijn/Lek	-	-	80%	n.b.
- Grensmaas	-	-	ca. 90%	n.b.
- Zandmaas	-	-	97%	n.b.
- Zuid-Holland	-	-	n.b.	n.b.
“natte waterbodems”				
- onderhoud (kl 1 + 2)	55% (50%)	10% (25%)	35%	n.b.
- sanering en onderhoud (kl 3 en 4)	10% (85%)	10% (50%)	80%	n.b.

omive = organische microverontreinigingen; Cl-omive = gechloteerde organische microverontreinigingen; anomive = anorganische microverontreinigingen; mave = eutrofiërende stoffen

n.b. = niet beschikbaar

* tussen haakjes staan de percentages van het genoemde deel dat biologisch reinigbaar kan zijn

Binnen de categorie “droge waterbodems” zijn de zware metalen bepalend voor de klasse-indeling. Organische, al of niet gechloroerde, microverontreinigingen komen wel voor maar zijn van ondergeschikte betekenis voor de klasse-indeling. Binnen de groep zware metalen is in het rivierengebied van Oost-Nederland zink voor meer dan 80% bepalend voor de klasse-indeling, gevolgd door achtereenvolgens koper en arseen. Voor de Zandmaas en Grensmaas is zink nog meer bepalend voor de indeling, daarna komt cadmium.

Voor de “natte waterbodems” is in tabel 2 op basis van de gegevens uit het eindrapport “Biologisch Reinigen” tevens een inschatting gegeven van het biologisch reinigbare deel van de organische en gechloroerde organische microverontreinigingen. De percentages die tussen haakjes staan weergegeven betreffen expert guesses.

Indien deze gegevens worden gekoppeld aan de gegevens uit tabel 1 dan kan worden geconcludeerd dat in potentie circa 30% van het aanbod aan klasse 2 specie als biologisch reinigbaar kan worden aangemerkt (circa $90 * 10^6$ in-situ m^3 in de periode tot 2015) en iets minder dan 15% van het eventuele aanbod aan klasse 3 en 4 specie vrijkomend zowel bij sanering als onderhoud (bijna $30 * 10^6$ in-situ m^3 in de genoemde periode).

Indien bedacht wordt dat van de laatst genoemde categorie klasse 3 en 4 specie (totaal $203 * 10^6 m^3$) circa 43% bestaat uit saneringsspecie, dan betekent dit dat theoretisch circa $12 * 10^6$ in-situ m^3 ook feitelijk voor biologische in-situ behandeling in aanmerking komt. Dit is minder dan 3% van het totale potentiële aanbod aan klasse 2, 3 en 4 specie (zowel onderhoud als sanering) voor de periode tot 2015.

Bovenstaande gegevens betreffen een situatieschets over het verontreinigingsbeeld zoals dat op dit moment bekend is. Ook bij het ontwikkelen van in-situ opties voor de sanering van de waterbodem-verontreinigingen moet worden bedacht, dat nog tot tal van (diffuse) bronnen het watersysteem beïnvloeden en dat in algemene zin sprake kan of zal zijn van herverontreiniging.

Primair wordt bij herverontreiniging gedacht aan een verontreiniging met materiaal vanuit het buitenland. Hiervoor is de concentratie van verontreinigingen van zwevend stof een meetlat. De kwaliteit van zwevend stof dat afkomstig is uit het buitenland, is zeer duidelijk aan het verbeteren, maar nog steeds niet optimaal.

Voor het materiaal dat bij Lobith via de Rijn ons land binnenkomt, geldt dat vanaf 1990 slechts een enkele keer klasse 4 is gemeten ten gevolge van Cd (1% van de monsters), Cu (2%) en Zn (4%). Klasse 3 specie komt in de waarnemingen van monsters veel vaker voor. Hiervoor geldt:

Cd en Zn	: 0%
Cu	: 16%
Ni	: 30%
EOX	: 20%
PAK	: 8%
HCB	: 43%
PCB	: 1-5%
DDT	: 14%.

Het totaalbeeld is dat de aangevoerde specie van de volgende kwaliteit is:

klasse 1	: 1%
klasse 2	: 70%
klasse 3	: 23%
klasse 4	: 6%.

Bij het hoogwater in 1993 en 1995 is ook bij de Maas klasse 2 tot 4 materiaal aangetroffen. Bij de Waal is bij het hoogwater ook klasse 4 materiaal aangetroffen. Dit laatste lijkt niet te rijmen met het klasse 2 materiaal dat bij de grens het land binnenkomt en wat feitelijk wordt verwacht bij de Waal. Hier wordt de nadruk gelegd op "lijkt", aangezien er nog een andere factor beschouwd moet worden, namelijk nalevering vanuit de waterbodem.

Binnen het rivierbed kan materiaal door middel van resuspensie en resedimentatie stroomafwaarts worden afgezet. Aangezien het rivierbed een aanzienlijke hoeveelheid klasse 4 herbergt, is het niet meer dan logisch om rekening te houden met de herverontreiniging die op deze manier plaatsvindt.

Bij het zoeken naar in-situ opties zal terdege rekening moeten worden gehouden met herverontreiniging vanuit het systeem zelf. Verwacht wordt dat dit, in ieder geval bij de rivieren in het oosten en het midden van het land, voorlopig een grotere impact zal hebben dan de herverontreiniging vanuit het buitenland.



PROJECTMANAGEMENT &
MILIEUADVIES

