

**NOBIS 96-1-02
KWALITEITSVERBETERING
VAN BAGGERSPECIE OP
BASIS VAN EXTENSIEVE
BIOSRESTAURATIE IN
COMBINATIE MET
ENERGIETEELT**

Ir. D. Boels (SC-DLO)
Ir. J.J.H. van den Akker (SC-DLO)
Ing. J.E Dijkhuis (Bioclear)
Drs. R. Duijn (De Vries en van de Wiel)
Drs. J. Harmsen (SC-DLO)
Ing. R. Kampf(Uitwaterende Sluizen)
Dr. Ir. W. Ma (IBN-DLO)
A. van der Toorn (SC-DLO)
Ir. G.D. Vermeulen (IMAG-DLO)
Drs. J. J. van der Waarde (Bioclear)

Maart 1999

Gouda, CUR/NOBIS

Titel rapport
Kwaliteitsverbetering van baggerspecie op
basis van extensieve bios restauratie in
combinatie met energieteelt

CUR/NOBIS rapportnummer
96-1-02
Project rapportnummer
96-1-02

Auteur(s)
Ir. D. Boels
Ir. J.J.H. van den Akker
Ing. J.E Dijkhuis
Drs. R. Duijn
Dr. Ir. W. Ma
Drs. J. Harmsen
Ing. R. Kampf
A. van der Toorn
Ir. G.D. Vermeulen
Drs. J. J. van der Waarde

Aantal bladzijden
rapport: 52

Uitvoerende organisatie(s) (Consortium)
DLO Staring Centrum (Ir. D. Boels 0317 474281)
IMAG-DLO (Ir. G.D. Vermeulen 0317 476321)
IBN-DLO (Dr. Ir. W. Ma 0317 477840)
Uitwaterende Sluizen (Ing. R. Kampf 0299 391377)
Bioclear (Drs. J.J. van de Waarde 050 5717920)
De Vries en van de Wiel (Drs. R. Duijn 0224 21211)

Uitgever
CUR/NOBIS, Gouda

Samenvatting

Met medefinanciering van NOBIS is een onderzoek uitgevoerd inzake het door DLO ontwikkeld concept van landfarming en energie teelt (biomassa voor energie opwekking) voor het goedkoper verwijderen van PAKs en olie uit baggerspecie met van nature aanwezige micro-organismen. Een methode is ontwikkeld voor het ramen van de huidige en toekomstig hoeveelheden baggerspecie die volgens dit concept kunnen worden gereinigd. Ecologische- en verspreidingsrisico's (geen bodembeschermende voorzieningen) zijn gemeten en bleken nagenoeg afwezig. Benaderingen zijn ontwikkeld voor het kwantificeren van biologische afbraak, maximale laagdiktes van de baggerspecie, interacties tussen de wilg en baggerspecie, aanbrengingstrategie, kosten en opbrengsten. Geconcludeerd is dat dit concept voor de praktijk aantrekkelijke mogelijkheden biedt en toegepast kan worden. Dit project heeft daarvoor een aantal belangrijke praktische handreikingen opgeleverd.

Trefwoorden

Gecontroleerde termen:
Biologische afbraak, biomassa, ecologische
risico, landfarming, minerale olie, verspreiding,
PAK

Vrije trefwoorden:
Handreiking, laagdikte, kosten,
ontwatering, opbrengst, rijping, wilg

Titel project
Landfarm & Energieteelt

Projectleiding
SC-DLO (Ir. Boels
0317 474281)

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

Report title
Quality improvement of dredged materials through
bioremediation combined with biomass
production for energy generation

CUR/NOBIS report number
96-1-02
Project report number
96-1-02

Author(s)
Ir. D. Boels
Ir. J.J.H. van den Akker
Ing. J.E Dijkhuis
Drs. R. Duijn
Drs. J. Harmsen
Ing. R. Kampf
Dr. Ir. W. Ma
A. van der Toorn
Ir. G.D. Vermeulen
Drs. J. J. van der Waarde

Number of pages
report: 52

Executive organisation(s)(Consortium)

DLO Staring Centrum (Ir. D. Boels +31 317 474281)
IMAG-DLO (Ir. G.D. Vermeulen +31 317 476321)
IBN-DLO (Dr. Ir. W. Ma +31 317 477840)
Uitwaterende Sluizen (Ing. R. Kampf +31 299 391377)
Bioclear (Drs. J.J. van de Waarde +31 50 5717920)
De Vries en van de Wiel (Drs. R. Duijn +31 224 21211)

Publisher
CUR/NOBIS, Gouda

Abstract

An research project has been carried out with cofinancing of NOBIS with respect to landfarming and biomass production for energy generation. This project aimed at obtaining a clear understanding of the capabilities of this concept for remediation of PAH and mineral oil contaminated dredging materials in terms of remediation effect, remediation time and costs. The project has also focussed on the actual and future quantities potentially suitable to be treated according to this concept, the associated environmental risks, conditions for and quantification of biological degradation, application depth and application strategy of the slurry, interaction between the willow crop and dredging material, costs and benefits. Although not each question could be answered and some uncertainties remained, it could be concluded that the concept offers attractive opportunities for practical application. This project has provided key information for designing the appropriate technology.

Keywords

Controlled terms:
Landfarming, biodegradation, biomass PAH,
mineral oil, dispersion risk, ecological risk

Uncontrolled terms:
Design support , application depth.
costs, willow, dewatering ripening,

Project title
Landfarm & Biomass production

Projectmanagement
SC-DLO (Ir. Boels +31 317 474 281)

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

Voorwoord

Met medefinanciering van NOBIS en het ministerie van LNV-DWK zijn de mogelijkheden voor de biologische reiniging van verontreinigde baggerspecie op basis van landfarm in combinatie met energieteelt op een semi-praktijkschaal onderzocht. Het onderzoek is uitgevoerd door een consortium bestaande uit IMAG-DLO, SC-DLO, De Vries en van de Wiel, IBN-DLO, Bioclear, Waterschap van de Uitwaterende Sluizen in Hollands Noorderkwartier. Door IMAG-DLO, SC-DLO en De Vries en van de Wiel is een samenwerkingsverband opgericht (EUROJOULE) om de benodigde infrastructuur te faciliteren die nodig is voor dit type langjarig onderzoek. Het IMAG-DLO heeft daartoe een deel van haar proefbedrijf 'De Oostwaardhoeve' ter beschikking gesteld en de Provincie Noord-Holland heeft de daarvoor benodigde vergunningen verleend.

Een commissie bestaande uit Ing J.H.A.M. Verheul (NOBIS), Dr. Ir. P. Doelman (IWACO), Ing. H.J. van Veen (TNO-MEP), Ir. S.P. Steltenpool (waterschap Hollands Kroon), Ir. G.J. de Nooy (waterschap Groot Haarlemmermeer), Ir. A. Schuurman (DLG), Dr. B. van der Wal (STOWA), Dr. M. Ferdinandy (RIZA), Drs. J.J. Klokman (Provincie Noord-Holland) heeft het onderzoek begeleid.

Met het oog op de afloop van NOBIS, oorspronkelijk t/m dec. 1998, was meerjarenfinanciering van dit onderzoek en is de proefopzet aangepast. De fase van ontwatering en rijping die enkele jaren vergt, is daarom vermeden. Het onderzoek is begonnen met steekvaste bagger waarin wilgen zijn ingeplant. De hergroei van wilg na aanbrengen van natte specie is in een aparte proef bestudeerd. De resultaten per deelonderzoek zijn in afzonderlijke rapportages vastgelegd. Deze kunnen worden aangevraagd bij DLO-Staring Centrum, Wageningen. Dit rapport bevat een samenvatting van de resultaten van het onderzoek in de periode sept. 1997 t/m dec. 1998.

Inhoudsopgave

VOORWOORD	v
SAMENVATTING	viii
SUMMARY	xi
1 INLEIDING	1
2 DOELSTELLING ONDERZOEK	3
2.1 Het DLO-concept	3
2.2 Onderzoekvragen	3
2.3 Onderzoekdoelstelling	3
3 AANPAK ONDERZOEK	5
3.1 Voorbereidende fase	5
3.2 Desk studie aanbod	5
3.3 Veldonderzoek	6
3.3.1 Laagdikte en risico's	6
3.3.1.1 Inrichting proefveld	6
3.3.1.2 Monitoring	8
3.3.2 Aanbrengingstrategie	9
3.3.2.1 Inrichting proefveld	9
3.3.2.2 Monitoring	10
4 ONDERZOEK RESULTATEN	11
4.1 Methodiek raming potentieel regionaal aanbod	11
4.1.1 Basisgegevens	11
4.1.2 Methode	11
4.1.3 Toepassing methodiek in Noord-Holland	13
4.1.4 Toekomstige aanwas en kwaliteit	16
4.1.5 Conclusies en aanbevelingen	17
4.2 Risico's	18
4.2.1 Ecologische risico's	18
4.2.2 Verspreidingsrisico's	21
4.2.3 Conclusies en aanbevelingen	23
4.3 Verloop biologische reiniging	25
4.3.1 Uitgangssituatie	25
4.3.2 Afbraakpotentieel	25
4.3.3 Afbraakcondities	26
4.3.4 In situ afbraak PAK en minerale olie	27
4.3.5 Conclusies en aanbevelingen	28
4.4 Interactie wilg-baggerspecie	30
4.4.1 Karakterisering rijping	30
4.4.2 Weersgesteldheid	30
4.4.3 Gemeten rijping	32
4.4.3.1 Ingeplante ontwaterde bagger	33
4.4.3.2 Natte baggerspecie tussen wilg	34
4.4.4 Modelleren van het rijpingsproces	34
4.4.5 Invloed van planten met een model bepaald	34
4.4.6 Ontwikkeling afbraakcondities	36
4.4.7 Conclusies	37

4.5 Effect van baggerspecie op de groei van wilg	38
4.5.1 Wilg aangeplant op ontwaterde baggerspecie	38
4.5.2 Gevestigde wilg na toediening van natte baggerspecie	38
4.5.3 Conclusies	40
4.5.4 Aanbeveling	40
5 HANDREIKINGEN, PERSPECTIEVEN, KOSTEN	41
5.1 Laagdikte	41
5.1.1 Realisatie volledige rijping	41
5.1.2 Handhaven aërobe condities	42
5.2 Ontwateringstoestand	43
5.2.1 Vochtspanning onderzijde specielaag	43
5.2.2 Ontwateringsdiepte	44
5.3 Saneringsduur	44
5.4 Potentieel van het reinigingsconcept	44
5.4.1 Potentiële hoeveelheden en belangrijke verwerkingsroutes	45
5.4.2 Kosten	46
6 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	49
6.1 Onderzoek	49
6.2 Potentieel reinigbare hoeveelheid baggerspecie	49
6.3 Toediening	49
6.4 Verspreidingsisico's	49
6.5 Ontwatering en rijping	50
6.6 Ecotoxicologische effecten	50
6.7 Mogelijkheden en mate van afbraak PAK en minerale olie	50
6.8 Interactie wilg en baggerspecie	51
6.9 Laagdikte	51
6.10 Ontwateringseis	51
6.11 Toepassingsperspectief	51
6.12 Kosten	51
LITERATUUR	54

Samenvatting

Landfarm & energieteelt is een door DLO ontwikkeld concept voor het verwijderen van PAKs en olie uit waterbodems met behulp micro-organismen die van nature in land bodems worden aangetroffen. Het concept berust op het aanbrengen van waterbodems (baggerspecie) in een bestaand of nieuw in te planten wilgenbestand waarbij geen speciale bodembeschermende voorzieningen worden getroffen. Verwacht werd dat de wilg het saneringsproces versnelt en daarnaast een financiële opbrengst geeft. Het hout wordt gebruikt voor energieopwekking, waardoor dit concept ook bijdraagt aan het realiseren van de doelstelling om in het jaar 2005 minstens 10% van de energiebehoefte te dekken uit duurzame bronnen. In een hieraan voorafgaande definitie studie is aangetoond dat dit concept perspectieven biedt. Nader onderzoek was nodig om het concept op te schalen naar een toepasbare praktische methode en om de daarvoor geldende randvoorwaarden te bepalen.

Het onderzoek is eind 1997 gestart en betrof: (1) een bureaustudie om een methode te ontwikkelen voor de raming van de hoeveelheden baggerspecie die biologisch gereinigd kan worden. (2) een grootschalige veldproef, waarin het saneringsproces en verspreidingsrisico's zijn bestudeerd in reeds ontwaterde baggerspecie bij verschillende laagdiktes en al dan niet ingeplant met wilg, (3) een kleinschalige veldproef, waarin de hergroei van een bestaand wilgenbestand na het aanbrengen van natte baggerspecie is bestudeerd en (4) laboratoriumonderzoek voor het bepalen van ecologische risico's, afbraakpotentieel en fysische karakteristieken voor de ontwatering en rijping.

De methode voor de raming van de hoeveelheden te reinigen baggerspecie is gebaseerd op gemeten chemische samenstelling van waterbodems, het oppervlakte open water in de onderscheiden sub-gebieden en de laagdikte van de baggerspecie in de watergangen en deelt de aanwezige hoeveelheden in naar klassen op grond van grenswaarden voor die klasse indeling. De methode is toegepast in het ambtsgebied van het Hoogheemraadschap Uitwaterende Sluizen in Hollands Noorderkwartier, waar ca. 10 miljoen m³ baggerspecie klasse 3 en 4 wordt aangetroffen. Hiervan kan 21% van de klasse 4 en 59% van de klasse 3 in kwaliteit worden verbeterd met het DLO-concept.

Om de fase van ontwatering over te slaan is voor het merendeel van de proefonderdelen uitgegaan van ontwaterde baggerspecie. Deze heeft een lutumgehalte van ca. 17% en een organische stofgehalte van ca 7%. Op basis van het PAK (54 mg/kg ds.) en minerale olie (gem. 860 mg/kg ds) kon de specie in klasse 4 worden ingedeeld. Het gehalte aan zware metalen is laag genoeg om de gereinigde waterbodems als bouwstof af te zetten.

Rijping van de ontwaterde baggerspecie is gekarakteriseerd met een eenvoudig te bepalen rijpingfactor. Rijping is ondanks de overvloedige regenval in 1998 voortgeschreden, maar er kon geen invloed van de in dat jaar ingeplante wilg worden vastgesteld. Gelet op de zeer geringe wortelontwikkeling was dit overigens te verwachten. Modelberekeningen hebben echter laten zien dat zowel de combinatie van een ondiep wortelende gewas met een dunne laag baggerspecie als een diep wortelende gewas met een dikke laag baggerspecie effectief is. Uitgaande van de eis dat volledige rijping moet worden gerealiseerd en de afbraakcondities ook in perioden met neerslagoverschot gehandhaafd moeten worden, kon worden berekend dat de laagdikte van baggerspecie zoals in dit onderzoek is toegepast, beperkt moet blijven tot 0,4 – 0,9 m op basis van gerijpte grond. Dit verschil in laagdikte is het gevolg van variaties in de zuurstofdiffusiecoëfficiënt. De ontwatering en drainage moet overigens aan bepaalde eisen voldoen. Een vuistregel is daarvoor ontwikkeld, waarmee het te handhaven slootpeil kan worden bepaald. De ontwatering moet minstens voor 60% aan de landbouwcriteria voldoen. Op basis van de ontwateringseisen zijn locaties met geringe ontwateringdiepte (< 0,4 – 0,6 m -mv) zijn minder geschikt voor een landfarm volgens het DLO-concept.

De afbraaksnelheid bleek zowel op basis van speciale laboratoriumtesten als metingen in het veld gering te zijn en voor veldomstandigheden te gering om betrouwbaar te kunnen vaststellen in een periode van een jaar. Voor 1999 wordt een significante afbraak van minerale olie verwacht. Wel is een verandering in de PAK-samenstelling gemeten, hetgeen wijst op afbraakprocessen. De totale afbraak in laboratoriumbatchproeven lijken een goede indicatie te geven van de te verwachten afbraak in een seizoen.

De afbraakcondities waren matig tot redelijk. Ondanks het voorkomen van zuurstof, bleek uit de redoxmetingen dat zowel aërobe als anaërobe zones naast elkaar voorkomen. Vermoedelijk vindt afbraak alleen plaats in kleine, aërobe aggregaten en in een dunne aërobe schil rond de grotere aggregaten en

zou er een samenhang kunnen bestaan tussen de aggregatiegraad (rijpingsgraad), verhouding aëroob en anaëroob en afbraaksnelheid. Aanbevolen is om dit nader in samenhang met de biobeschikbaarheid te onderzoeken.

De bijgroei van biomassa van de wilg die in 1998 in de ontwaterde specie was aangeplant bleef beperkt tot minder dan 0,2 ton per ha, terwijl 2,5 ton gangbaar is. De laagdikte van de baggerspecie heeft geen invloed op de ontwikkeling van de wilg. Wel hebben de droogte periode direct na de inplant, de daarop volgende extreem natte perioden, het bladverlies door insectenvraat en schimmelinfectie een zeer nadelige invloed gehad op de groei en ontwikkeling van de wilg.

Verspreidingsrisico's naar de bodem, het grond- en oppervlakte water zijn niet geconstateerd. Wel blijkt een toename van het zoutgehalte en verlaging van de zuurgraad van het water dat via de baggerspecie in de bodem infiltreert het gehalte van de van nature aanwezige zink in het bodemvocht te verhogen. Herverdeling van dit metaal in de bodem kan optreden. Met het oog op de interpretatie van risico's en monitoringsgegevens is nader onderzoek aan dat fenomeen is gewenst.

Ecologische risico's zijn in bioassays met regenwormen onderzocht. Er is geen sprake van mortaliteit (acute toxiciteit), noch van significante effecten van de verontreiniging, hoewel sub-letale effecten denkbaar zijn. Niet uitgesloten moet worden dat deze effecten samenhangen met de invloed van de slecht ontwikkelde bodemstructuur in de bagger op de vitaliteit van wormen. Het verder volgen van ecologische risico's is gewenst.

De proef met hergroei van een bestaande wilgen gewas waarin natte specie was aangebracht, is uitgevoerd met specie met 20% lutum en 14% organische stof, die in laagdiktes van 0,25; 0,50 en 1,0 m is aangebracht. De bijgroei op het veldje met 1 m natte specie bleek spectaculair te zijn: 15 – 18 ton/ha tegen ca. 7 ton/ ha gangbaar. De aanvankelijk laag van 1 m natte bagger bleek aan het eind van het groeiseizoen afgenomen tot ca 0,6 m. Gebleken is dat als gevolg van zijwaartse scheutvorming het plantverband bij baggerspecie lagen van 0,5 – 1,0 m verloren gaat en machinale oogst sterk bemoeilijkt. Dit vereist speciale aandacht. Aanbevolen wordt om de bijgroei en wortelontwikkeling te monitoren.

Vanuit kostenooptpunt is het aan te bevelen om de natte baggerspecie in een keer in een laagdikte van 1 m aan te brengen. Vermoed wordt dat de specie na drie jaar berijdbaar is en de wilg machinaal geoogst kan worden. Voldoende zekerheid is hierover niet verkregen.

De perspectieven voor het DLO-concept zijn voor Noord-Holland beoordeeld. Uitgaande van de voorwaarden die in dit rapport zijn opgesomd, kan de kwaliteit van 40 % van de klasse 2 baggerspecie, 30% van de klasse 3 en 10% van de klasse 3 volledig worden verbeterd. Hoewel in alle gevallen de PAK- en minerale olie gehalten voldoende verlaagt kunnen worden, kan als gevolg van de gehalten van zware metalen vaak geen klasse 0 worden bereikt. Klasse 4 blijkt vrijwel hoofdzakelijk door het gehalte aan zware metalen te worden bepaald. Voor het Hoogheemraadschap Uitwaterende Sluizen betekent dit dat ca. 35 % van de totale hoeveelheid verontreinigde baggerspecie in klasse 2 t/m 4 met het DLO-concept kan worden verbeterd. De kosten van de landfarming bedragen ca. f 17,= per ton droge stof voor klasse 2 en f 28,= tot f 32,= per ton droge stof voor klasse 3 en 4.

De resultaten van dit onderzoek tonen aan dat sanering van verontreinigde baggerspecies zoals zijn onderzocht (17-20% klei en 7-14% organische stof) volgens het DLO-concept geschikt is op goed gedraineerde locaties met een minimale ontwateringsdiepte van 0,4 – 0,6 m –mv.

Verspreidingsrisico's zijn afwezig, mits oppervlakkige afstroming wordt voorkomen. Het achterwege laten van vloeistof dichte bodembeschermende voorzieningen is gerechtvaardigd.

Het gehalte van minerale olie heeft voor de onderzochte baggerspecie geen invloed op de reinigingsduur, deze blijkt voornamelijk te worden bepaald door het gehalte van een aantal slecht afbreekbare PAK-soorten. De verwachte reingingsduur zal 10 tot meer dan 20 jaar belopen.

Ecologische risico's bleken bij de onderzochte baggerspecie vrijwel afwezig en worden gelet op de bioassay met regenwormen ook niet verwacht. Men zou daarom kunnen concluderen dat de noodzaak ontbreekt om gereinigde baggerspecie te verwijderen en dus verwijderingskosten niet gemaakt hoeven te worden. Uitgaande van het vermoeden dat in de toekomst meer zal worden uitgegaan van risico

benadering, zou nu al bij de locatiekeuze van landfarms geanticipeerd kunnen worden op ruimtelijke ontwikkelingen en de inrichting en bestemming van de landfarm daarop kunnen worden afgestemd. Vanuit die optiek verdient sanering van waterbodems een plaats in het proces van ruimtelijke ordening en inrichting.

Uit globale berekeningen is gebleken dat na verwijdering van verontreinigde baggerspecie ook in de toekomst nog aanwas van de klasse 3 en 4 specie verwacht mag worden zolang verschillende bronnen van vervuiling niet gesaneerd zijn. Dit gegeven pleit er voor om tevens de sanering van de waterbodem in te bedden in programma's voor het verbeteren van de oppervlaktewaterkwaliteit.

Summary

Landfarm and biomass production for energy generation has been developed to clean up PAH and mineral oil contaminated sediments. The concept includes the application of the (wet) sediment in an existing willow crop, without special soil protective precautions, or the planting of willow in (wet) sediments. The willow is supposed to enhance the biological degradation processes and to provide a financial yield or contribute to nature development. The wood will be used as an energy resource for electricity production. Energy production from biomass supports the national policy to procure 10% of the nations energy demands from renewable resources. A preceding definition study has shown the potential of the concept, but recommended additional research to upgrade the concept to the level of an applicable technology.

The project has begun at the end of 1997 and included: (1) a desk study to develop a methodology to estimate regionally the quantity of sediments that potentially can be treated according to this concept, (2) a field experiment to study the biological degradation processes and conditions and assess environmental risks. Different depths of sediments have been applied and planted with willow; (3) a small scale experiment to investigate the development of willow after applying wet sediments at different depths to the crop and (4) laboratory research to determine the degradation potential, ecological risks and soil physical characteristics associated with ripening, fluid and gas transport in the sediment.

The method of estimating the potential regional sediment supply was based on the chemical composition of the sediments, the wet area in the sub-regions and the depth of sediments in water courses and applied in the area of Hoogheemraadschap Uitwaterende Sluizen in Hollands Noorderkwartier where a quantity of about 10 million m³ sediments class 3 and 4 is found. A portion of 21% of the class 4 and 59% of class 3 sediments can be improved through the DLO-concept. It has been shown that after the removal of all contaminated sediments, locally sediments of classes 3 and 4 will be generated again.

To gain time the stage of dewatering of sediments has been skipped in the field experiments by applying already dewatered sediments. The applied sediments contain 17% clay and 7% organic matter. According to its PAH- (54 mg/kg dry matter.) and mineral oil (gem. 860 mg/kg dry matter) content the sediments were classified as class 4. The heavy metal contents comply with legal requirements for the application in earth constructions

Ripening can be characterised fairly well through the ripening factor. Despite the abundant rainfall in 1998, the ripening of the sediments has proceeded. No effect of the willow crop on the ripening process could be observed. The poor developed root system of this crop is mainly held responsible for the absence of any response. However, model simulations of the ripening process have shown that shallow application depth of sediments and shallow rooting crops as well as relatively large application depths and deep rooting crops are both efficient in terms of dewatering and ripening. When full ripening is required, while the degradation conditions should be maintained also during periods of average excess rainfall, the maximum depth of fully ripened sediments should be limited to 0,4 – 0,9 m. The magnitude of the oxygen diffusion coefficient determines this depth significantly. A rule of thumb has been developed to determine the water level in open drains to maintain suitable drainage conditions. Sites with water table depths less than 0,4 – 0,6 m below soil surface are assumed less suitable for landfarms.

The degradation rate of PAH and mineral oil according to laboratory tests proved to be small, negligible or insignificant. Field observations show the same trend. Laboratory test, however, predict significant degradation of mineral oil in 1999. Analysis of PAH has shown a change in composition, which can be attributed to small degradation rates. The degradation conditions in the field were reasonable to poor. Despite the observed oxygen concentration in the soil atmosphere, redox-potential measurements unveil the simultaneously occurrence of aerobic and anaerobic zones in the soil. It is believed that thin zones with aerobic conditions are found at the surface of the larger (saturated) soil aggregates. Most probably degradation occurs in well aerated small soil aggregates and in these zones, making a close relationship likely between the rate of soil aggregation or soil structure formation, bio-availability of contaminants and degradation rate.

The biomass production of the willow planted in 1998 in the dewatered sediment was poor and did not

exceed a quantity of 0,2 tons per ha., while 2,5 tons per ha is common. Major causes are unfavourable conditions during planting and there after, loss of leaves due to insect invasion, followed by an infection of black cancer (*Glomerella singulata* (Ston.)). No negative effects were observed from application depth of the sediments.

Wet sediments with 19% clay and 14% organic matter, were applied at depths of 0.25, 0.5 and 1.0 m to a existing willow crop. The biomass production of the willow crop in the experiments with wet sediments, was spectacularly high compared to the reference crop (15-18 ton per ha against 7 tons per ha for reference crop). The initial depth of the sediments of 1 m was 0.6 m at the end of the first year of application. Due to the formation of side branches on the cutted crop in plots with 0,5 till 1,0 m of sediments, mechanical harvesting will be hampered. Further monitoring of root development and biomass production is recommended.

From a cost analyses is recommended to apply wet sediments at once in a layer of 1.0 m. The bearing capacity of the sediments after 3 years is assumed sufficient for the harvesting machinery, although insufficient evidence is present to support this.

The application potential of the DLO-concept has been evaluated for the situation in the province of Noord-Holland. This unveiled that 40% of the class 2 sediments, 30% of the class 3 and 10% of the class 4 can be improved. Although in all cases the PAH and mineral oil contents are sufficient low, the contents of heavy metals is too high for a class 0. The class 4 sediments are mainly contaminated with heavy metals. For the area of the Hoogheemraadschap Uitwaterende Sluizen the conclusion has been drawn, that about 35% of the class 2 trough 4 can be improved according to the developed method. The treatment costs vary from Dfl 17,= per ton dry matter for class 2 sediments till Dfl 28,= till 32,= per ton dry matter of class 3 and 4 sediments.

Dispersion of contaminants from the sediments in the soil, ground and surface water has not been observed. Soil protective precautions can therefor be omitted.

The mineral oil content of the sediments in this experiment do not determine the treatment period. This is dominated by the PAH-contents and especially the slow degradable fractions. Treatments from 10 till 20 years are expected.

Ecological risks seems small or negligible according to the bioassays with *Lumbricus rubellus*. Removal of the cleaned sediments from the landfarm is not necessary. It is expected that in the future more emphasis will be laid on environmental risks rather than maximum concentrations of soil contaminants. Therefor it is recommended to anticipate on this development by amalgamating the procedure of searching suitable locations for landfarming with spatial land use planning.

Calculations reveal that also in the future, after removal of actual contaminated sediments from water courses, again contaminated sediments of class 3 and 4 will be generated. This advocates for combining programmes for clean up polluted sediments with programmes for the sanitation of polluting sources.

1 Inleiding

“Nederland, Waterland” is geen onbekend thema en daaraan kunnen we met evenveel recht “Nederland, Baggerland” aan toevoegen. Talloze generaties hielden zich er in ons land mee bezig. De aandacht is een historische constante, de beweegredenen daarentegen worden sterk door de tijdsgeest bepaald. Was bagger eens gewild om er laaggelegen land mee op te hogen, nu is het wegens z’n verontreiniging bedreigend voor het natuurlijk aquatisch systeem. Behalve dat te veel bagger hinderlijk is voor scheepvaart en waterafvoer, is het ook een milieuprobleem dat om een oplossing vraagt. In dit rapport zijn resultaten beschreven van onderzoek dat is uitgevoerd met medefinanciering van NOBIS en het ministerie van Landbouw, Natuur en Visserij (LNV-DWK)

De omvang van het probleem is geschetst door Harmsen et al., 1997, die tot de slotsom komen dat de jaarlijks potentieel te reinigen hoeveelheid specie ruim 5 miljoen kubieke meter bedraagt waarvan ongeveer 3 miljoen kubieke meter ernstig is verontreinigd (regionale wateren). Deze hoeveelheden zijn exclusief de hoeveelheden in het Hollands Diep, Ketelmeer, Nieuwe Waterweg en het Beneden rivierengebied (rijks wateren). Ook is verontreinigde bagger uit het landelijk gebied niet in deze cijfers verwerkt omdat daarover onvoldoende bekend is.

Over een breed front is milieubeleid ontwikkeld om de problemen het hoofd te bieden. De insteek is om nieuwe verontreinigingen te voorkomen of op z’n minst tot aanvaardbare proporties terug te brengen. Het beleid kent twee sporen: (1) het preventie-spoor waarbij stringente eisen worden gesteld aan lozingen op het oppervlaktewater en met ‘end of pipe’ technologieën op grote schaal water wordt gezuiverd, en (2) het curatief-spoor om historische verontreinigingen te saneren.

De aard en herkomst van verontreinigingen zijn divers. Men onderscheidt organische (olie, PAK, bestrijdingsmiddelen etc) en anorganische verontreinigingen (zware metalen). Om de ernst van verontreiniging aan te geven is een classificatie is ontworpen. Gehaltes van anorganische of organische verontreiniging bepalen de klassengrenzen. Baggerspecie die is ingedeeld in klasse 0 is vrij van verontreinigingen. Specie tot en met klasse 2 is matig verontreinigd en mag op de kant naast de waterlopen worden verwerkt in een strook ter breedte van niet meer dan 20 m. Klasse 3 en 4 gelden als ernstig verontreinigd.

Uit de studie van Harmsen et al., 1997, blijkt dat waarschijnlijk ruim de kwaliteit van de helft van de hoeveelheid baggerspecie in klasse 3 en 4 verontreinigd wordt bepaald door het gehalte aan PAKs (polycyclische aromatische

koolwaterstoffen) terwijl diezelfde specie op basis van het gehalte aan zware metalen zou zijn ingedeeld in klas 0. De hoeveelheid specie in de klassen 3 en 4 is ca. 16% van de te reinigen totale hoeveelheid.

Methoden om verontreinigde baggerspecie te saneren zijn eveneens divers en hangen af van de aard van de verontreiniging en het beoogd resultaat. Veel methoden zijn duur en worden dan ook mondjesmaat toegepast. Daarentegen is het storten in een definitieve berging, financieel aantrekkelijk, maar kan zich niet in een breed maatschappelijk draagvlak verheugen.

Afbraak van organische verontreinigingen door van nature aanwezige micro-organismen, de zogenaamde biologische sanering, is een van de alternatieven. Biologisch afbreekbare verontreinigingen vallen uiteen in onschadelijke stoffen zolang de omstandigheden gunstig zijn. Naarmate de afbraak vordert, verloopt het proces steeds langzamer. Deze reinigingsmethoden leggen daarom langdurig beslag op de toch al schaarse en dure ruimte.

Door DLO is een saneringsconcept ontwikkeld waarbij de ruimte die de biologische sanering in beslag neemt nuttig wordt gebruikt en wordt ingeplant met een gewas dat een financiële opbrengst geeft of kan worden gezien als natuurontwikkeling. De verwachting is dat het gewas de omstandigheden voor biologische afbraak verbetert en zelf profiteert van nutriënten die tijdens het mineralisatieproces vrijkomen.

Bij de ontwikkeling van het DLO-concept is ook veel geleerd van de inmiddels historische ervaring met de versnellen van de ontwatering van slappe kleibodems bij de inpoldering van de IJsselmeerpolders door riet in te zaaien.

Het saneringsconcept gaat uit van ernstig verontreinigde baggerspecie die via biologi-

sche reiniging op termijn herbruikbare grond oplevert. Met name richt het zich op de baggerspecie met biologische afbreekbare PAKs (> 10 mg/kg ds) en/of olie (> 1500 mg/kg ds) in de klasse 3 of 4. Overige verontreinigingen mogen tot een klasse voorkomen waarbij hergebruik als bouwstof volgens het Bouwstoffen Besluit van 1995 mogelijk is en de uitloogbaarheid aanvaardbaar i.v.m. mogelijke verspreiding van verontreinigingen in de bodem. Voor zware metalen wordt bijvoorbeeld uitgegaan van species die voldoen aan de normen voor categorie 1 bouwstof.

In de experimenten is gekozen voor de wilg omdat dit gewas al in onderzoek is voor de ontwikkeling van de productie van biomassa voor energieopwekking en behoort tot de duurzame energiebronnen. Daarbij wordt dus ook bijgedragen aan het streven om in het jaar 2010, 10% van de energiebehoefte uit zulke bronnen te dekken. Bovendien is de

wilgenteelt volledig gemechaniseerd en is de afzet gewaarborgd

De wilg gedijt ook onder natte omstandigheden en is dus bij uitstek geschikt in natte baggerspecie. Doordat dit gewas al vroeg in het voorjaar bladeren vormt en laat ze pas laat in het najaar vallen is de waterbehoefte veel groter dan van een doorsnee akkerbouwgewas (bijna 1,5 keer). Voor het bevorderen van ontwatering en het creëren van geschikte omstandigheden voor biologische afbraak is dat zeer gunstig..



DLO-concept in ontwikkeling
Natte baggerspecie wordt aangebracht in een wilgenbestand

2 Doelstelling onderzoek

De bruikbaarheid van biologische methoden voor reiniging van baggerspecie is inmiddels onomstreden. Toepassing bleef beperkt omdat de vereiste reinigingsgraad niet in korte tijd werd bereikt. Recentelijk onderzoek heeft aanwijzingen opgeleverd dat na verloop van tijd een zeer goede kwaliteitsverbetering kan worden verkregen. Maar juist die tijdsduur leek bezwaarlijk vanuit het oogpunt van grondkosten. Door DLO is daarom voorgesteld om de biologische reiniging te combineren met een bepaald bodemgebruik zoals de teelt van wilgen (biomassa) waaruit energie kan worden opgewekt (energieteelt). Een haalbaarheidsonderzoek die aan deze studie vooraf ging liet zien deze combinatie financieel aantrekkelijk lijkt. Ten aanzien van de praktische toepasbaarheid bleken nog enkele vragen te bestaan die om oplossing vroegen: laagdikte, bodembeschermende voorzieningen, condities voor biologische afbraak, hergroei wilg, aanbrengingstrategie, ecologische en verspreidingsrisico's, potentieel reinigbare hoeveelheden baggerspecie. Dit onderzoek beoogt een aantal van die vragen te beantwoorden.

2.1 Het DLO saneringsconcept

Het reinigen van baggerspecie gebeurt in twee fasen. In de eerste fase vindt ontwatering van natte specie plaats, begint de rijping (vorming van vaste bodem en bodemstructuur) en wordt een deel van de gemakkelijk afbreekbare organische verontreinigingen afgebroken. In de tweede fase zet de rijping door en ontstaat een stabiele bodemstructuur. Harmsen et al, 1997, vonden aanwijzingen dat na de aanvankelijk snelle afbraak van PAKs in een intensieve landfarm, afbraak nog wel doorgaat, maar aanzienlijk langzamer. Zij vermoeden dat de alle PAKs (en olie) uiteindelijk volledig worden afgebroken, mits de omstandigheden gunstig blijven. Deze omstandigheden komen overeen met de eisen die landbouwgewassen aan de bodem stellen: een goede zuurstofvoorziening in een voldoende dikke laag grond (PSOW-studie, SC-DLO, 1997).

Door de te reinigen baggerspecie in te planten met een diep en intensief wortelend gewas dat bovendien nog veel water verbruikt, wordt biologische afbraak tot op relatief grote diepte mogelijk. Bovendien zou dat de biologische beschikbaarheid van verontreinigingen vergroten (Aprill and Sims, 1990; Schwab and Banks, 1994; Terry, 1998).

Het realiseren van goede omstandigheden voor onbelemmerde plantengroei en condities voor afbraak van organische verontreinigingen vereist een snelle afvoer van overtollige neerslag en dat gaat niet samen met vloeistofdichte bodembeschermende voorzieningen. In bepaalde gevallen kunnen deze ook achterwege blijven zoals door Harmsen et al., 1996 aannemelijk is gemaakt. Deze auteurs geven aan dat uitspoeling van verontreiniging naar de bodem, grond- en oppervlaktewater (verspreiding) niet

waarschijnlijk is wanneer onder de baggerspecie een bodemlaag met een relatief hoog gehalte aan organische stof aanwezig is.

2.2 Onderzoeksvragen

Om het DLO-concept voor praktijktoepassingen te ontwikkelen dienden nog een aantal onzekerheden te worden opgelost:

- 1 de potentiële hoeveelheid baggerspecie in regionale wateren die volgens dit concept gereinigd kan worden. Met andere woorden: heeft het zin om dit concept verder te ontwikkelen;
- 2 welke aanbrengingstrategie van baggerspecie is optimaal in verband met de ontwatering- en afbraaksnelheid van verontreinigingen en de groei en ontwikkeling van de wilg.;
- 3 in hoeverre beïnvloedt de wilg het ontwatering- en rijpingsproces;
- 4 in hoeverre versnelt de wilg de afbraak van organische verontreiniging en hoe lang duurt de biologische reiniging;
- 5 is het denkbaar dat op de lange termijn toch verspreiding van verontreinigingen uit de baggerspecie naar de bodem, grond- en oppervlaktewater optreedt? (vloeistofdichte bodembeschermende voorzieningen ontbreken immers);
- 6 bestaan er bij grootschalige toepassing reële ecologische risico's?
- 7 hoe hoog zijn de kosten van het concept;
- 8 aan welke voorwaarden dient een locatie voor dit concept te voldoen?
- 9 welke zijn de overige randvoorwaarden zoals de logistiek, benodigde vergunningen, bestemmingsplannen en maatschappelijke acceptatie.

2.3 Onderzoekdoelstellingen

De onderzoeksvragen zijn vertaald in een aantal concrete onderzoekdoelstellingen:

- 1 het ontwikkelen en toepassen van een methodiek voor het bepalen van de potentiële hoeveelheden baggerspecie die in een bepaalde regio volgens het DLO-concept biologisch gereinigd kunnen worden;
- 2 het bepalen van de interactie tussen wilg en het ontwaterings/rijping- en het afbraakproces in relatie tot de laagdikte;
- 3 het bepalen van verspreiding- en ecologische risico's;
- 4 het bepalen van kosten factoren en het vaststellen van de kosten van het concept;
- 5 het verspreiden van opgedane kennis en ervaring via een NOBIS-on site dag, een themadag, publicaties in bladen, interviews en pers-voorlichting.

3 Aanpak onderzoek

Het onderzoek omvat een deskstudie voor de bepaling van de hoeveelheden baggerspecie die potentieel volgens het DLO-concept gereinigd kunnen worden en de kosten van het concept, een semi-praktijk onderzoek naar de interacties tussen wilg en baggerspecie en verspreidingsrisico's en laboratorium onderzoek van ecologische risico's en potentiële afbraaksnelheid van de organische verontreiniging. Het veldonderzoek is uitgevoerd op de IMAG-DLO proefboerderij 'Oostwaardhoeve' te Slootdorp, waar zowel deskundig personeel, geschikte proefcondities en de benodigde vergunningen aanwezig waren. Hoewel de aard van de te onderzoeken processen langjarig onderzoek vergt, is de looptijd van het onderzoek in verband met de afloop van NOBIS tot een jaar beperkt.

3.1 Voorbereidingsfase

Bij de keuze van de locatie voor het veldonderzoek diende rekening te worden gehouden met een langzaam verlopende afbraak van PAKs in de tweede fase van het reinigingsproces, de levenscyclus van de wilg met één oogst per drie tot vier jaar, en de immobiliteit van de verontreiniging in de baggerspecie. Daarom is uitgegaan van een lange duur van de experimenten.

Een locatie was dus nodig waar langdurig en onder gecontroleerde omstandigheden onderzoek kan plaats vinden en de bodem wegens de eisen die het verspreidingsonderzoek stelt, onverdacht diende te zijn.

Gekozen is voor het IMAG-DLO proefbedrijf "De Oostwaardhoeve" te Slootdorp in de Wieringermeer. Op dit bedrijf worden al zeer lang landbouwkundige experimenten uitgevoerd en experimenteert men sinds 1993 met de teelt van energiegewassen. Daarover is inmiddels veel kennis ontwikkeld en zijn de voor deze teelt benodigde apparatuur, werktuigen en verwerkingstechnieken aanwezig en is de afzet van biomassa verzekerd.

Het personeel is goed opgeleid en heeft ruime ervaring met het uitvoeren van complexe veldproeven.

De grond van het proefbedrijf is niet verontreinigd. Het risico voor verspreiding van verontreinigingen in het grondwater is afwezig dank zij de aanwezigheid van kwel. De bestaande bouwvoor bevat voldoende organische stof en lutum om eventueel uitlopende verontreinigingen uit de baggerspecie effectief te binden.

In mei 1997 is de beheersorganisatie "EuroJoule" opgericht, waarmee voldaan is aan verplichtingen voor het verkrijgen van de

benodigde vergunningen. De dagelijkse leiding is in handen van de bedrijfsleider van "de Oostwaardhoeve". EuroJoule is een samenwerkingsverband van IMAG-DLO (Wageningen), Milieutechniek de Vries & van



de Wiel (Schagen) en SC-DLO (Wageningen). Alle werkzaamheden rond de aanvraag van de benodigde vergunningen, de monitoring t.b.v. de vergunningen, de aanvoer, afvoer en acceptatie van de specie, het aanbrengen van de specie en de administratie worden in principe door deze beheersorganisatie uitgevoerd.

3.2 Deskstudie reinigbare hoeveelheden

Een methode is ontwikkeld om te bepalen hoeveel baggerspecie in de regionale wateren op dit moment aanwezig is en gereinigd zou kunnen worden en hoeveel dat in de toekomst zou kunnen zijn (aanwas). De bestaande informatie over chemische analyses van waterbodems die in databases is opgeslagen, is zoveel mogelijk gebruikt. In deze data bestanden is geen informatie voor handen over hoeveelheden. Die worden benaderd door het studiegebied onder te verdelen in deelgebieden. Per deelgebied bepaalt men het water-oppervlak wordt de laagdikte van

bagger in de waterlopen geschat op basis van mondelinge informatie van waterbeheerders. Deze hoeveelheden zijn op grond van hun kwaliteit ingedeeld in kwaliteitsklassen. Aan de hand van de afbraaksnelheid van individuele PAK's en het bereikbaar PAK gehalte is nagegaan welke kwaliteitsverbetering per klasse bereikt kan worden met het DLO-saneringsconcept. Voor de presentatie van de veelheid aan gegevens is een GIS-methode (Geografisch Informatie Systeem) gebruikt. Het ambtsgebied van het Hoogheemraadschap Uitwaterende Sluizen van Noord-Holland heeft als studie gebied gefungeerd (Harmsen en Kampf, 1998). De toekomstige aanwas en de kwaliteit van baggerspecie is met behulp van een door het RIVM ontwikkelde rekenmethode benaderd.

3.3 Veldonderzoek

Het veldonderzoek is opgezet om het effect van de laagdikte op reiniging en beplanting te onderzoeken en verspreidings- en ecologische risico's te analyseren en te kwantificeren. Ook diende de vraag te worden beantwoord of baggerspecie als ontwaterde dan wel natte specie dient te worden aangebracht, waarbij nog onderscheid kan worden gemaakt tussen het inplanten van de wilg na aanbrengen van de baggerspecie en baggerspecie aanbrengen in een bestaand wilgengewas ('aanbrengingsstrategie').

In het veldonderzoek zijn twee varianten onderzocht. In de ene variant is ontwaterde baggerspecie aangebracht waarin wilgen zijn ingeplant. Deze variant is mede gekozen om gegeven de korte onderzoeksperiode, de fase van ontwatering te kunnen overslaan. Deze variant is gebruikt om de maximale laagdikte en ecologische en verspreidings-risico's te bepalen.

De tweede variant betreft een veldje waar natte specie is aangebracht in een bestaand wilgen gewas. In deze variant is de hergroei van de wilg na aanbrengen van de specie bestudeerd.

3.3.1 Laagdikte en risico's

3.3.1.1 Inrichting proefveld

In fig. 1 is de inrichting van het proefveld schematisch weergegeven. Er zijn velden aangelegd met laagdiktes van 0,25; 0,5 en 0,75 m baggerspecie. Het veld met 0,25 en 0,50 m bagger is gebruikt voor onderzoek aan verspreidingsrisico's. Voor de bestudering van de invloed van wilg op het reinigingsproces is een deel van het veld met 0,75 m bagger niet ingeplant. De velden met 0,75 m baggerspecie zijn gebruikt om de invloed van wilg op het verloop van de reiniging te bestuderen en om de omstandigheden te bepalen waaronder afbraak plaats vindt (Vermeulen, 1998).

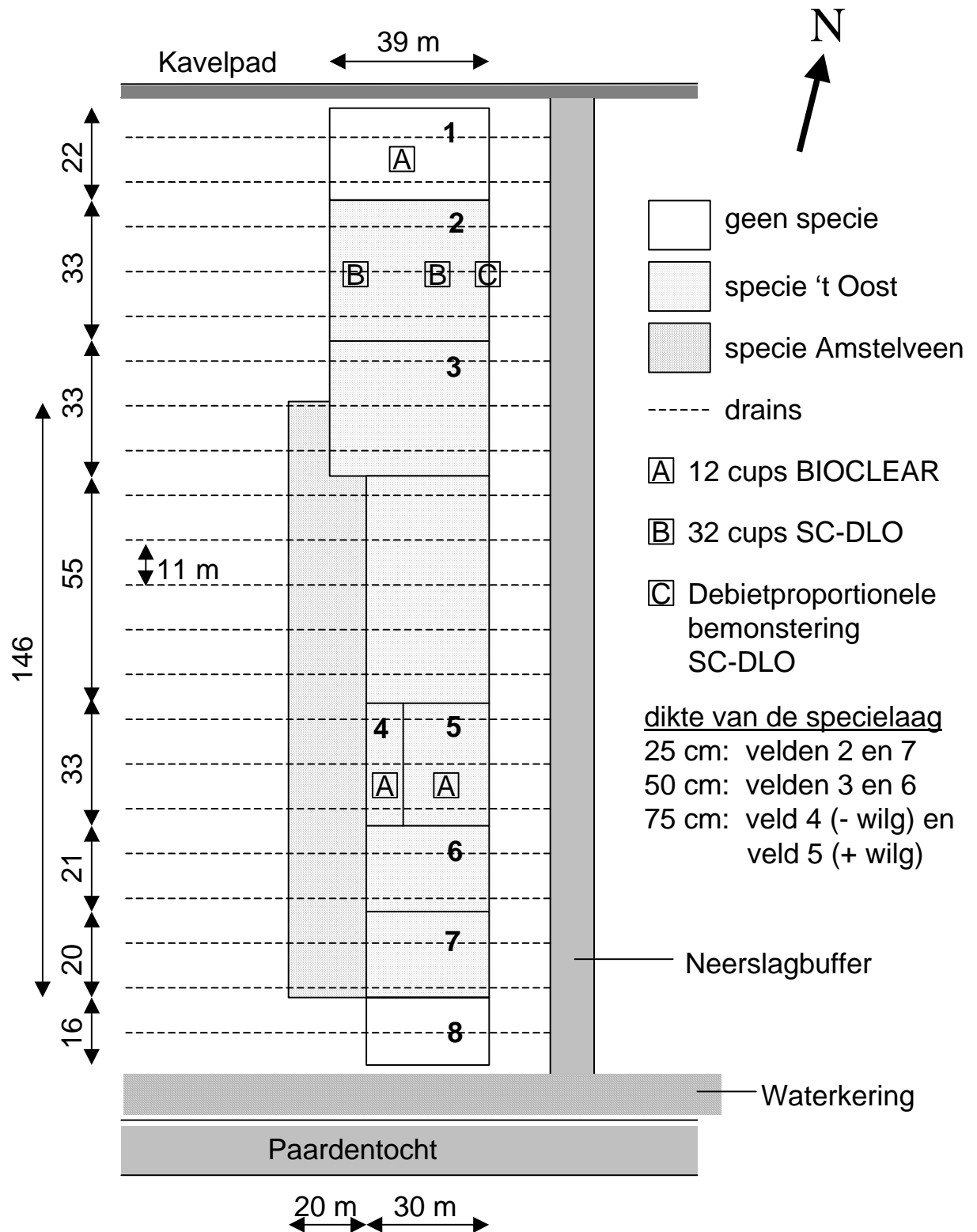
In december 1997 werd met vrachtwagens ontwaterde, steekvaste baggerspecie aangevoerd, over rijplaten naar de kopakker van het proefveld gereden, op het perceel gelost en vervolgens met een hydraulische kraan met lange giek op de veldjes aangebracht in de gewenste laagdikte. Doordat veel minder voor het onderzoek geschikte specie voorhanden was dan gepland kon het proefveld aanvankelijk maar ten dele worden aangelegd. Besloten werd om de veldjes te verkleinen en met het vrijkomende materiaal de behandelingen te completeren. Dit werd in februari 1998 uitgevoerd. De aangevoerde specie had een drogestofgehalte van ca. 65 %. In tabel 1 zijn enkele kenmerken van de specie weergegeven. Na rijping is dit een matig humeuze, kalkrijke zware zavel.

Voor het planten van wilgen in de natte specie zijn enkele opties: uitrollen van 'wilgenmatten' en het 'zaaien' van stekken. Hierbij ontstaat geen plantverband, waardoor machinale oogst met de huidige apparatuur niet mogelijk is. In dit onderzoek ging het om de productie van energie, zodat een plantverband nodig was.

Pas begin mei was het droog genoeg om de baggerspecie te bewerken en wilg (*Salix viminalis*) in te planten.

Tabel 1. Kalkgehalte, organische stofgehalte en granulaire samenstelling van de ontwaterde (steekvaste) specie.

Component	Fractie	
	% van drogestof	% van minerale delen
Carbonaat	3,0	
Organische stof	7,5	
Klei	< 2 µm	17,0
Silt	2 – 50 µm	24,0
Zand	> 50 µm	48,5



Figuur 1 Indeling proefveld

De groeiomstandigheden waren slecht. Direct na het planten volgde een droogteperiode die overging in een zeer natte periode. Er ontstond een behoorlijke onkruiddruk. De jonge wilgenstekken werden eerst aangetast door het

wilgenhaantje (*Phyllodecta vulgatissima* (L.)) en een daarna door een schimmel (zwarte kanker, *Glomerella singulata* (Ston.)).

Vanwege de chemische bepalingen aan de baggerspecie en het grondwater werd besloten om geen chemische bestrijding van onkruid en ziekten toe te passen.

3.3.1.2 Monitoring

De monitoring betreft:

- 1 verloop van de afbraak van PAK en olie op de velden met 0,75 m baggerspecie (met en zonder wilg);
- 2 verloop van de afbraakcondities;
- 3 biologische activiteit van de baggerspecie;
- 4 verloop van de rijping;
- 5 uitspoeling van verontreinigingen naar de bodem, grond- en oppervlaktewater op de velden met 0,25 en 0,5 m baggerspecie;
- 6 ecologische risico's;
- 7 groei en ontwikkeling van de wilg.

Afbraak PAK en olie

In het voorjaar, einde zomer en najaar zijn de velden bemonsterd in de lagen 0-25; 30 – 60 en 60 – 90 cm –mv. Van deze monsters zijn de gehalten aan PAK (VROM 10) en minerale olie bepaald. De eerste metingen en de metingen aan het einde van de zomer zijn in vijfvoud uitgevoerd.

Op het laboratorium zijn batch-proeven uitgevoerd om de potentiële afbraak bij optimale omstandigheden te bepalen. Deze proeven geven inzicht in de mogelijke afbraak in een seizoen. Ook zijn de aantallen bacteriën gemeten die specifiek minerale olie afbreken (Van der Waarde, 1998).

Verloop afbraakcondities

Het verloop van de afbraakcondities is bepaald aan de hand van meting van het zuurstofgehalte in de bodemlucht en in situ meting van de redoxpotentiaal.

Het zuurstofgehalte is gemeten door luchtmonster te trekken uit ingegraven luchtkamertjes op vier dieptes: 0,1; 0,25; 0,5 en 0,75 m –mv. Op die dieptes is de fractie met luchtgevulde poriën gemeten aan volume monsters (100 cc).

De redoxpotentiaal is op alle velden gemeten in elke laag van 0,1 m vanaf maaiveld tot aan de onderzijde van de baggerspecie.

Biologische activiteit

De biologische activiteit is gekarakteriseerd op de velden met en zonder wilg en verschillende laagdiktes. Veldtesten zijn uitgevoerd om de aërobe en anaërobe ademhaling te meten.

Daartoe zijn analyses van bodemlucht op O₂, CO₂, H₂S en CH₄ gecombineerd met analyses van bodemvocht op NO₃, SO₄, NH₄, N_{kj}, TOC, Fe(II), Fe(III) en PO₄.

Speciale elektrodes zijn in het veld gebruikt voor de meting van O₂, redox, S²⁻ en temperatuur.

Verloop rijping

Rijping is het proces waarbij nat sediment als gevolg van waterverlies overgaat in bodemmateriaal met een zekere structuur. De rijpingstoestand wordt gekarakteriseerd met het rijpingsgetal volgens Pons en Zonneveld, 1965. Dit getal is op twee tijdstippen gemeten in de lagen 0 – 0,1; 0,15 – 0,25; 0,25 – 0,50 en 0,50 – 0,90 m –mv. Daartoe zijn direct na het aanbrengen van de baggerspecie en na 1 jaar uit elke laag kluitjes verzameld. Deze kluitjes zijn onder gecontroleerde omstandigheden verzadigd. Na verzadiging zijn de kluitjes gedroogd en het is vocht-, klei- en organische stofgehalte gemeten. Uit die gegevens wordt het rijpingsgetal berekend.

De invloed van rijping op bodemeigenschappen die van belang zijn voor transport van water en zuurstof in de bodem is afgeleid uit de vochtretentiekarakteristiek en onverzadigde doorlatendheidsrelaties. Deze eigenschappen zijn bepaald aan ongeroerde monster die aan het begin en einde van het groeiseizoen zijn gestoken in de proefstroken met 0,75 m bagger. De karakteristieken zijn volgens de verdampingsmethode van Boels et al. 1978, bepaald.

Ook is de krimp-karakteristiek bepaald. Deze karakteristiek geeft de samenhang tussen de vochtverhouding en de porieverhouding (volume water/volume vaste fase resp. volume poriën / volume vaste fase). Deze karakteristiek wordt bepaald aan kluitjes, die eerst volledig worden verzadigd en dan ingehuld in een waterdampdoorlatend materiaal. De kluitjes worden te drogen gehangen en regelmatig wordt het totaal volume van de kluitjes bepaald door het onderwatergewicht te bepalen.

Emissie naar bodem, grond en oppervlaktewater

In het kader van onderzoek van verspreidingsrisico's in de bodem en oppervlaktewater, zijn continu en proportioneel monsters van het drainagewater genomen waarin de gehalten aan zware metalen, PAKs en olie zijn gemeten. Dezelfde metingen zijn gedaan aan grond en

bodemvocht in en onder de baggerspecielaag op verschillende tijdstippen. Voor het kwantificeren van verspreiding zijn alle componenten van de waterbalans gemeten: neerslag, referentieverdamping (meteo-station De Kooy), drainafvoer en verandering van de vochtinhoud van het bodemprofiel (Harmsen et al. 1998).

Ecologische risico's

Ecologische risico's ontstaan als organismen in de bodem leven en daar hun voedsel zoeken. Deze organismen nemen de beschikbare verontreiniging op slaan dat (gedeeltelijk) op in de lichaamssweefsels. De effecten daarvan lopen uiteen van acute vergiftiging tot langzame achteruitgang van het reproductievermogen (directe effecten). Indirecte effecten betreffen de schade die andere organismen ondervinden die hun voedsel betrekken uit een keten waarvan de bodemorganismen deel uitmaken. Ecologische risico's zijn benaderd met behulp van bio-assays. Daartoe zijn proeven uitgevoerd met regenwormen (*Lumbricus rubellus*) bij een blootstellingduur van 32 dagen (Ma, W.C., 1998).

Groei en ontwikkeling van de wilg

Aan het einde van het groeiseizoen is de drogestofopbrengst van de wilg geschat volgens de methode van Gigler et al. (1998). Hierbij wordt per veldje op vier keer een oppervlakte van 12,5 m² de diameter van de stengels bepaald op 10 cm boven maaiveld. De relatie tussen deze diameter en de drogestofopbrengst per stengel werd m.b.v. regressieanalyse geschat uit de diameters en drogestofopbrengsten van 210 op de grens van de veldjes geogste stengels. De drogestofopbrengst per hectare werd berekend uit de gesommeerde drogestofopbrengst van de stengels in de waarnemingsvakken

3.3.2 Aanbrengingstrategie

3.3.2.1 Inrichting proefveld

Het aanbrengen van baggerspecie direct in natte vorm op het veld verdient waarschijnlijk de voorkeur boven toediening van reeds ontwaterde specie omdat de kosten van aparte ontwatering in een tussendepot dan uitgespaard worden (Harmsen et al., 1997). Natte specie kan aangebracht worden op een kaal veld of in een (geogste) wilganaanplant. Het voordeel van het aanbrengen in een bestaand wilgenbestand is dat:

- geen oplossing gezocht hoeft te worden voor het planten van wilg in natte specie;

- het wilgengewas zich al gevestigd heeft en zich daardoor wellicht sterker zal ontwikkelen in het eerste jaar;
- het veld minder lang een kale aanblik in het landschap biedt.

Een nadeel is dat op het moment van aanbrengen al een wilgengewas aanwezig moet zijn en de inplant enkele jaren vooraf aan het aanbrengen van de baggerspecie heeft moeten plaats vinden.

De natte specie kan voorts in één keer in een dikke laag aangebracht worden of in meerdere keren in dunne lagen. Het voordeel van dunne lagen zou een versnelde rijping kunnen zijn. Verwacht wordt dat de kosten van het éénmalig aanbrengen van een dikke laag potentieel lager zijn dan van het aanbrengen van een aantal dunnere lagen.

Welke aanbrengingstrategie zou moeten worden gekozen hangt onder andere af van het effecten van de natte toediening op zich en van de aangebrachte laagdikte op het opnieuw uitlopen en de bijgroei van wilg. Dit is onderzocht in een éénjarig experiment met drie natte aanbrengingstrategieën op basis van laagdikten van 100, 50 en 25 cm natte specie en een referentiebehandeling zonder baggerspecie.

Het proefveldje is aangelegd op kavel B20 zuid, waarop een 4 jaar oude wilganaanplant (kloon: *RAPP*) aanwezig was. De wilg was aangeplant volgens het "Zweedse" plantsysteem: in rijen met afwisselend een afstand van 75 en 150 cm tussen de rijen. Dit verband maakt het mogelijk om te wilg mechanisch te oogsten. De wielen van de oogstmachine rijden hierbij tussen de op 150 cm afstand aangeplante wilgenrijen. Per behandeling werd een veldje van 9 x 12 meter geselecteerd waarop de wilgenstengels 10-15 cm boven het aan te brengen baggerniveau werden afgesneden. Rondom de veldjes werd een keerwand van betonplaten aangebracht om wegstromen van de specie te voorkomen.

De specie ("Sassenheim specie") werd in februari en maart 1998 aangevoerd met vloeistofdichte vrachtwagens en in een ontvangtbassin gestort. Aanvankelijk werd de specie vanuit het bassin met een vacuüm mestzuiger met 12m³ inhoud opgezogen, naar het proefveld gereden en in de proefvakken, tussen de wilgenrijen gepompt. Doordat takjes en ander aanwezig vuil de zuigmond van de mestzuiger verstopt duurde het volzuigen van de tank onrealistisch lang. Later werd de specie achtereenvolgens met een hydraulische kraan

vanuit het bassin op een trilzeef gebracht om het zwerfvuil te verwijderen, opgevangen in een container en rechtstreeks via een pomp en een persleiding in de proefvakken gepompt tot de juiste laagdikte was bereikt.

Het drogestofgehalte van de specie in de vrachtwagen was gemiddeld 19,0%, variërend van 11,5 tot 38,3 %. De textuur van de specie kwam overeen met een zavelgrond (tabel 2).

Tabel 2 *Gemiddelde fysische samenstelling van de opgebrachte natte baggerspecie in % van de totale droge-stof massa*

Component	Fractie (%)
Organische stof	14.0
Klei (< 2 µm)	20.4
Silt (2 – 50 µm)	24.3
Fijn zand (50 – 210 µm)	22.0
Grof zand (210 – 2000 µm)	19.4

Het PAK-gehalte van de specie, gecorrigeerd naar 10% organische stof, was gemiddeld 8,4 mg/kg ds (som 10 van VROM) en het minerale olie gehalte 2861 mg/kg ds.

3.3.2.2 Monitoring

Voorafgaand aan de specietoediening werd per behandeling het aantal afgesneden stengels van een twaalf meter lange dubbel-rij wilgen geteld. Bij deze stengels werd in mei en in december waargenomen hoeveel stengels weer uitliepen en hoeveel nieuwe scheuten gevormd waren. In december werd ook de drogestofopbrengst van de bijgroei geschat volgens de methode van Gigler et al. (1998). Hierbij werd de diameter van de nieuwe scheuten bepaald op 10 cm boven het aanhechtpunt aan de oude stengel. De relatie tussen deze diameter en de drogestofopbrengst per scheut werd m.b.v. regressieanalyse geschat uit de diameters en drogestofopbrengsten van 118 aan de rand van het veld geogste scheuten. De drogestofopbrengst per hectare werd berekend uit de gesommeerde drogestofopbrengst van de scheuten in het waarnemingsvak met een oppervlakte van 27 m².

4 Onderzoeksresultaten

4.1 Methodiek raming regionaal aanbod

In een verkennende studie naar de haalbaarheid van biologische saneringsmethoden hebben Harmsen et al, 1997, aanbevolen om de reinigbare hoeveelheden baggerspecie te differentieren naar regio's en kwaliteit. In deze studie is voor de raming van die hoeveelheden een methodiek ontwikkeld en toegepast in het ambtsgebied van het Hoogheemraadschap Uitwaterende Sluizen in Hollands Noorderkwartier. Gegevens omtrent de chemische kwaliteit konden aan bestaande databestanden worden ontleend, gegevens omtrent hoeveelheden ontbraken en zijn benaderd. Inzicht is verkregen welke hoeveelheden gereinigd kunnen worden volgens het DLO-concept.

4.1.1 Basisgegevens

De methodiek voor de raming van reinigbare hoeveelheden baggerspecie vereist dat per relevant gebied de chemische samenstelling (en de hoeveelheid) baggerspecie bekend is. Voor de chemische kwaliteit is uitgegaan van het door Kampf (1998) opgezette bestand van baggerspecie bij het Hoogheemraadschap van Uitwaterende Sluizen in Hollands Noorderkwartier. Het grotere bestand van Rijkswaterstaat (RIZA, 1999) was nog niet beschikbaar.

Voor de invoer en verwerking van een groot deel van de gegevens in het bestand van Uitwaterende Sluizen is het programma BOOS gebruikt (waterbodem **Be**Oordeling **O**ndersteunend **S**ysteem), de opvolger van **LAWABO** (**L**andelijk **A**andelijk **B**estand **W**ater**B**odem). De gegevens zijn in een platte database structuur opgeslagen (Dbase III databestand, Bakker en Venema, 1997) en betreffen de locatie, algemene eigenschappen van de specie (bodemenkenmerken) en de vervuilinggraad. BOOS rekent vervolgens uit in welke klasse de specie thuis hoort. Deze systematiek is zowel bij Rijkswaterstaat als bij waterschappen in gebruik.

4.1.2 Methode

De potentiële reinigbare hoeveelheid baggerspecie is gekwantificeerd door kwaliteitsgegevens te verbinden met

hoeveelheden. Een aantal stappen zijn daarvoor nodig:

- Vaststellen van de kwaliteit (klasse) van de specie (gegevens uit databestand);
- Bepalen hoeveelheid baggerspecie per onderscheiden regio (GIS aanpak);
- Koppelen van de kwaliteit (klasse) aan een hoeveelheden;
- Bepalen van de fractie bagger, die met extensieve biologische reiniging kan worden verbeterd.

Met het programma BOOS is op basis van zowel individuele als alle stoffen bepaald tot welke klasse een baggerspecie behoort. Daaruit is de verdeling afgeleid van de totale hoeveelheid baggerspecie over de verschillende klassen. Het gebruikt dataset is representatief verklaard voor het gehele gebied (Kampf en Bernard, 1996).

De raming bevat nog onzekerheden: (1) de uniformiteit van de hoeveelheid bagger specie per onderscheiden regio (spreiding in zowel het nat oppervlak als laagdikte baggerspecie), (2) de representativiteit van de kwaliteitsgegevens voor de aangenomen hoeveelheid baggerspecie. De schatting kan worden verbeterd door de regio's op te delen in sub-gebieden en een schatting te maken van het wateroppervlakten en dikten van specielagen (locale schatting).

KADER 1

Normstelling PAK en Bouwstoffenbesluit

Bij gebruik van baggerspecie als bouwstof hoeft PAK slechts tot klasse 3 te worden gereinigd en is in veel gevallen het gehalte aan minerale olie maatgevend voor de kwaliteit. Olie laat zich biologisch goed verwijderen. Met de huidige norm (500 mg/kg d.s.) voldoet 28% van de Noord-Hollandse specie zonder reiniging niet aan de bouwstoffennorm voor minerale olie. Ook wordt volop gediscussieerd over het corrigeren van het PAK-gehalte voor het organisch stof gehalte. Al deze ontwikkelingen kunnen hebben invloed op de uiteindelijke hoeveelheid te reinigen baggerspecie. In dit rapport is hier echter geen rekening mee gehouden.

In de benadering is uitgegaan van de huidige klasse-indeling, waarbij klasse 0 het streefbeeld is. Op dit moment is dit in discussie en wijziging kan invloed hebben (zie kader 1 en 2)

De mate waarin biologische reiniging leidt tot kwaliteitsverbetering is gesimuleerd door de afname van gehalten van individuele PAK-gehalten te berekenen op basis van de gemeten afbraak (zie tabel 3). De reinigbaarheid van individuele species kan aanzienlijk verschillen (Doddema et al., 1998) Voor de verlaagde gehalten is met BOOS opnieuw de klassenindeling en de verdeling van de hoeveelheden over de klassen berekend. Het verschil tussen de actuele verdelingen en de verdeling na reiniging is het reinigbare deel. Bij extensieve reiniging is op lange termijn een verregaande reiniging mogelijk. Klasse 3 en 4 specie kunnen dan beiden worden omgezet in

een klasse 2 voor PAK en klasse 2 kan 'schoon' worden (klasse 0 voor PAK).

Tabel 3. Percentage van de oorspronkelijke hoeveelheid PAK's (restfractie) in baggerspecie klasse 3, na afbraak op de kant gedurende 1 jaar (Van den Toorn et al., 1997)

PAK	%	Opmerking
1 naftaleen	5	Geschat
2 acenaftyleen	10	Geschat
3 acenafteen	10	Geschat
4 fluoreen	9	
5 fenantreen	11	
6 antraceen	18	
7 fluoranteen	10	Geschat
8 pyreen	50	Geschat
9 benz[a]antraceen	45	
10 chryseen	61	
11 benzo[b]fluoranteen	50	Geschat
12 benzo[k]fluoranteen	35	
13 benzo[a]pyreen	69	
14 dibenz[a,h]antraceen	70	Geschat
15 benzo[ghi]peryleen	73	
16indeno[1,2,3cd]pyreen	89	

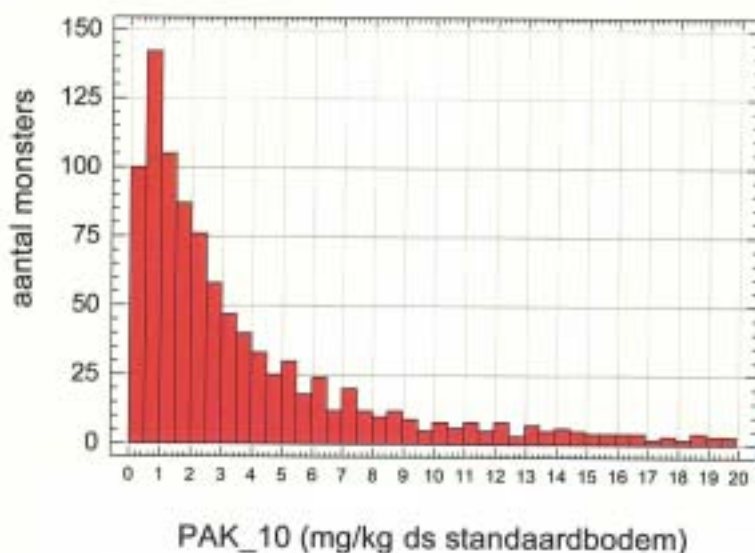
KADER 2

Frequentieverdeling PAK-gehalten

De klassengrenzen voor PAK zijn gebaseerd op de som van 10 PAK-verbindingen (Milbowa, 1991; Evaluatie Nota Water, 1993). Gehalten in mg/kg d.s. worden omgerekend naar een standaard bodem met een organisch stofgehalte van 10%

- <1 Klasse 0/1
- 1 - 10 Klasse 2
- 10 - 40 Klasse 3
- > 40 Klasse 4

In figuur.2 is de spreiding van de PAK-gehalten weergegeven met een frequentieverdeling. De waarnemingen boven 20 mg/kg d.s. (op basis van standaardbodem) zijn weggelaten. Het merendeel van de waarnemingen valt tussen de 1 en 5 mg/kg d.s.



Figuur.2. Frequentie verdeling van PAK-gehalten (mg/kg d.s. standaardbodem) in het Hollands Noorderkwartier. Het diagram beperkt zich tot de waarden 0-20 mg/kg d.s.

4.1.3 Toepassing methodiek in Noord-Holland

De methodiek is toegepast op het databestand van het Hoogheemraadschap Uitwaterende Sluizen. In figuur 3 is de ruimtelijke verdeling van de waterbodempkwaliteit in Noord-Holland weergegeven. Zoals te verwachten bevinden de meeste klasse 4 waterbodems zich rond de steden en industriële gebieden, met name geldt dit voor het zuiden van “De Waterlanden”. In de noordelijk gelegen landbouwgebieden is de kwaliteit beter. In fig. 4 is de verdeling in klassen weergegeven op basis van PAK en zware metalen. In 44% van de gevallen bepalen zware metalen de klasse-indeling en in 37% is de klasse indeling volgens beide criteria gelijk, en in 19% van de gevallen bepaalt PAK de klasse. In de boezems zijn zware metalen in 62% van de gevallen klasse bepalend tegenover slechts 8,9% de PAKs. De verdeling over de verschillende klassen is voor de inliggende waterschappen weergegeven in tabel 4.

De hoeveelheden baggerspecie zijn geschat op basis van het wateroppervlak en de dikte van de te baggeren laag (Tabel 5). Deze dikte varieert van 50 tot 100 cm in de boezem en van 20 tot 50 cm in de watergangen van waterschappen.

Om de kwaliteitsverbetering te benaderen die met landfarming te bereiken is, is de

afbreekbaarheid van individuele PAK's uit de gegevens in tabel 3 afgeleid. Afbraak leidt in veel gevallen tot een klassenverlaging voor PAK, maar in veel gevallen ook tot een algehele klassenverlaging wanneer PAK de klasse indeling heeft bepaald. Vergelijking van de oorspronkelijke PAK-gehalten met de gehalten na berekening van de afbraak, leert welke verbetering (klasse verschuiving) kan worden bereikt met biologische reiniging. In figuur 5 is dit weergegeven voor de complete dataset. Per klasse is weergegeven hoeveel monsters in die klasse blijven en hoeveel er in een lagere klasse terecht komen.

Gebleken is dat 21% van de klasse 4 specie door biologische sanering een klasse verbetering kan ondergaan. Voor 2% is zelfs klasse nul haalbaar. Dit lijkt niet waarschijnlijk, omdat het PAK-gehalte dan zou moeten dalen van >40 naar <1 mg/kg d.s. Bij nadere analyse blijken dit monsters te zijn uit het Noord-Hollandskanaal, waarin in grote delen de lichtere, goed afbreekbare PAK voorkomen.

Meer dan de helft van de klasse 3 specie kan worden omgezet in klasse 2 specie. Het heeft dan de kwaliteit dat het zou kunnen worden verspreid.

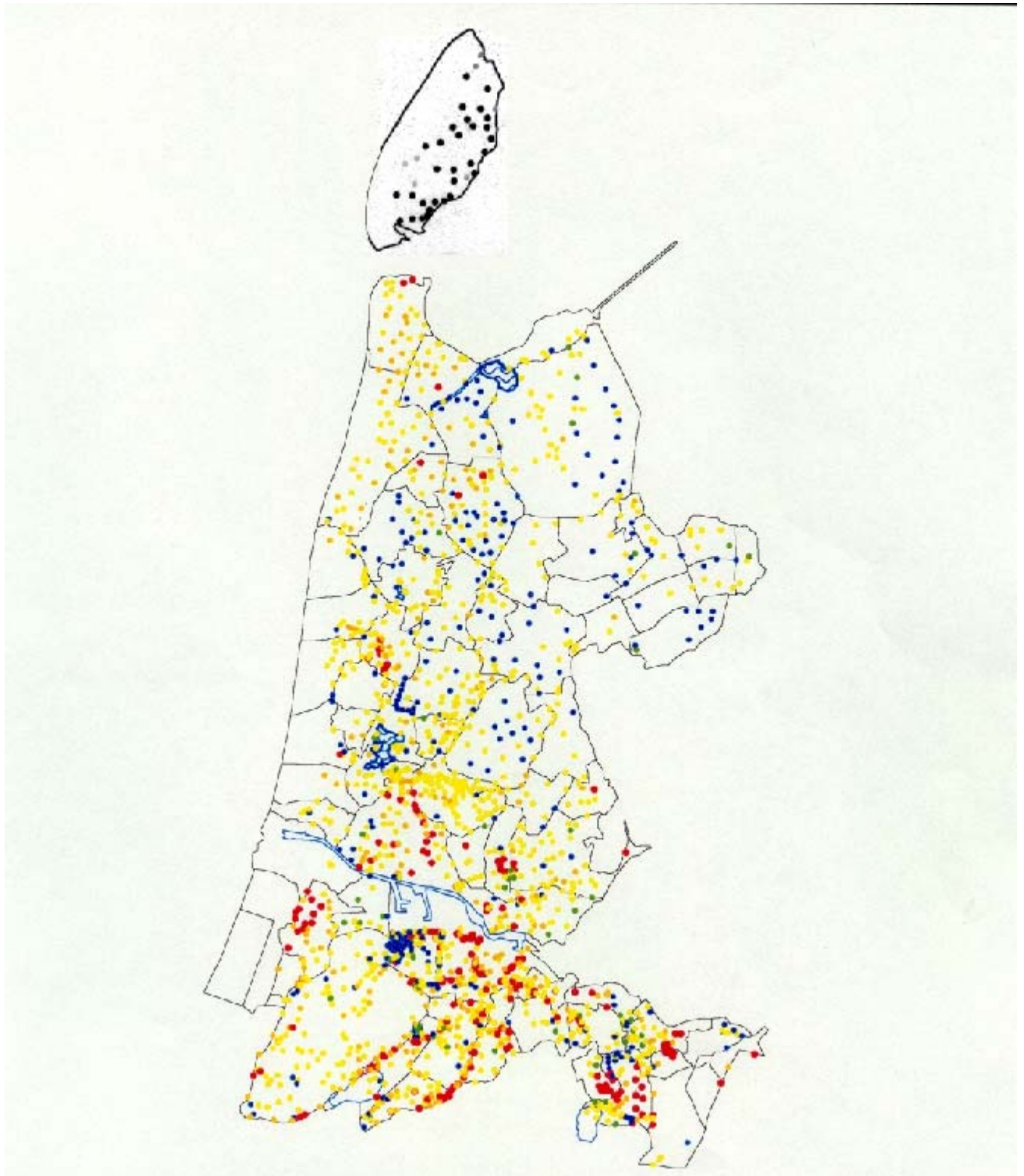
Tabel 4. Verdeling baggerkwaliteit (%) in de verschillende waterschappen en de boezem

	Klasse 0-1	Klasse 2	Klasse 3 +4
Boezems	1	72	26
Hollands Kroon	46	39	15
West Friesland	44	40	16
Groot-Geestmerambacht	18	59	24
Het Lange Rond	15	72	13
De Waterlanden	45	53	2
Totaal Hollands Noorderkwartier	22	60	18

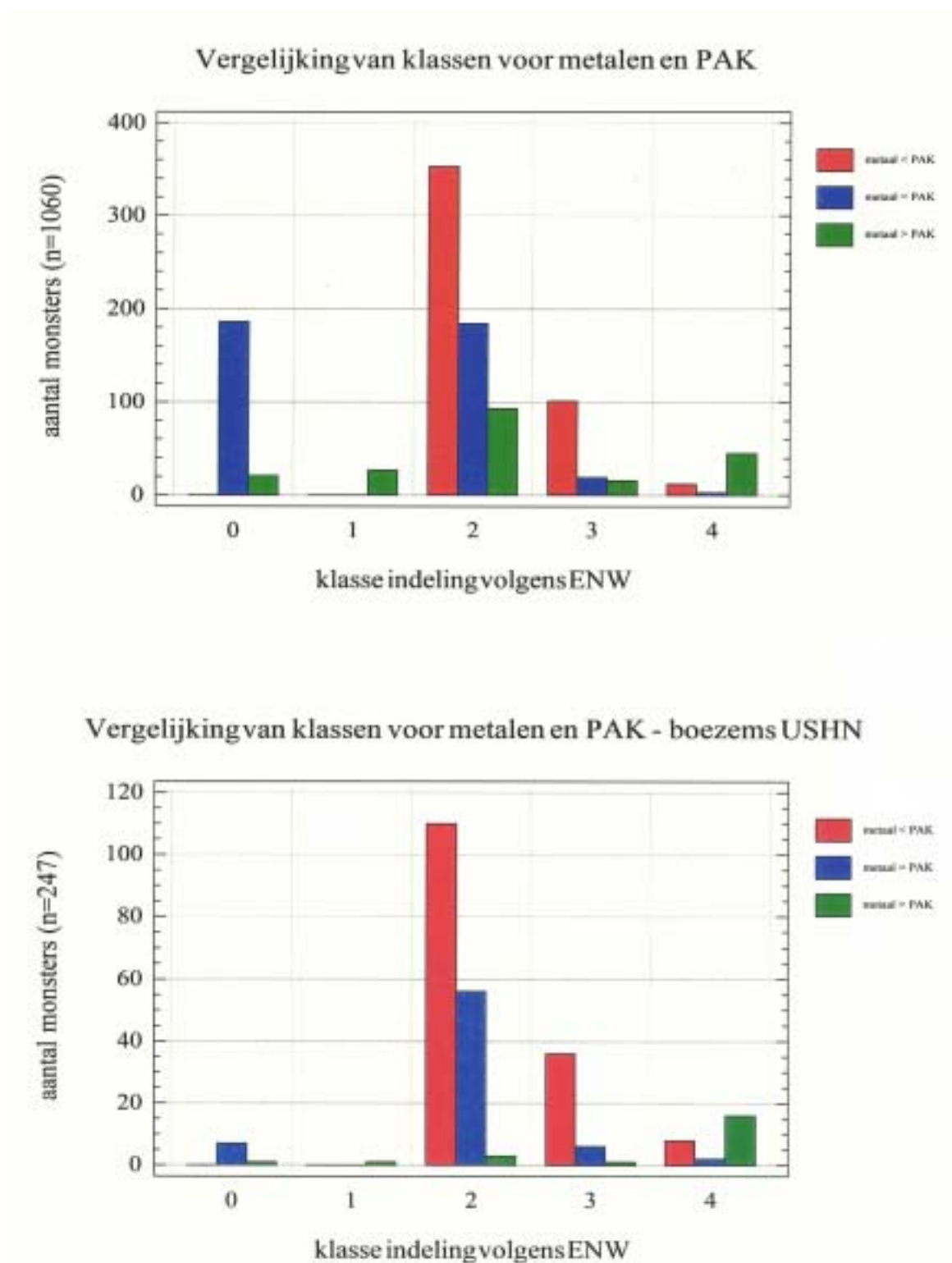
Tabel 5. Berekende verdeling van baggerspecie (in 1000 m³) over kwaliteits klassen in Noord-Holland

	Dikte	Klasse 3	Klasse 4
Boezems	50-100	2000-3000*	900-1250*
Hollands Kroon	20-50	200-500	20-40
West Friesland	20-50	50-130	0
Groot-Geestmerambacht	20-50	250-630	40-110
Het Lange Rond	20-50	330-830	190-480
De Waterlanden	20-50	450-1120	330-820
Totaal		3300-6200	1500-2700

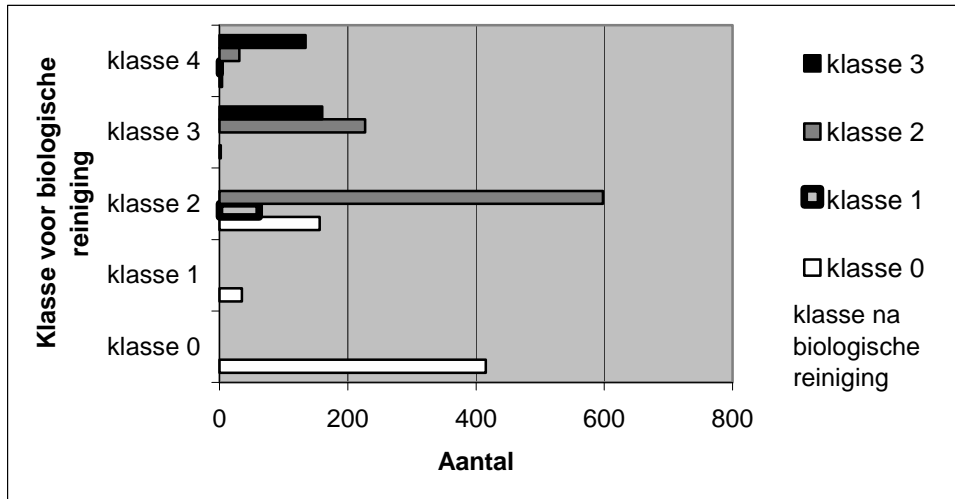
*inclusief hoeveelheden bekend uit nadere onderzoeken (1050 klasse 3 en 560 klasse 4)



Figuur 3. De kwaliteit van de waterbodem in Noord-Holland volgens ENW. Zwart = klasse 0; groen = klasse 1; Blauw = klasse 2; Oranje = klasse 3 en Rood = klasse 4



Figuur 4 . PAK of zware metalen bepalen de klassenindeling. Bovenste figuur voor alle wateren, onderste alleen de boezems



Figuur 5. Invloed extensieve biologische reiniging op de kwaliteit van baggerspecie

De grenzen van klasse 2 baggerspecie op basis van PAK-gehalte zijn vrij ruim: 1-10 mg/kg d.s. Om bagger van deze klasse te verbeteren tot klasse 0 moet in het algemeen veel PAK worden afgebroken. Dat lukt bij slechts 26% van de hoeveelheid in deze klasse, ook al omdat het gehalte aan zware metalen de indeling bepaalt.

De hoeveelheid reinigbare bagger in de klasse 3 en 4 verandert niet als rekening wordt gehouden met een langere reinigingsduur. Bij een lange reinigingsduur (10-40 jaar) gaat baggerspecie klasse 4 over in klasse 2 voor PAK. Rekening houdend met zware metalen, gaat 46% van de reinigbare specie over naar klasse 2 en 54% naar klasse 3. Bij een extensieve reiniging kan aanzienlijk meer klasse 2 worden gereinigd. Na biologische afbraak van PAK tot klasse 0 is 43% van de klasse 2 specie omgezet in klasse 0. De expert judgement van het potentiële jaarlijkse aanbod voor extensieve biologische reiniging in de

definitiestudie (Harmsen et al., 1997) komt voor klasse 2 en 3 redelijk overeen met de hier berekende hoeveelheid voor extensieve reiniging. Voor klasse 4 zijn de schattingen aan de hoge kant geweest vergeleken met de berekende hoeveelheden (zie tabel 6).

4.1.4 Toekomstige aanwas en kwaliteit

Voor de raming van de toekomstig aanwas en kwaliteit zijn de resultaten van de studie van Puijenbroek en Kampf (1998) gebruikt. Van verschillende locaties is de aanwas bepaald en gecombineerd met de belasting van PAK en zware metalen, waarmee de verwachte kwaliteit kon worden berekend. Een deel van het bestand van Uitwaterende sluisen (regionale wateren) leende zich voor deze raming. Uit deze studie blijkt dat ook in de toekomst baggerspecie in de klassen 3 en 4 ontstaat en dat die hoeveelheid in de regionale wateren niet geringer zal zijn dan er nu wordt aangetroffen

Tabel 6 Schatting van de bereikbare kwaliteit (% van aanbod per klasse) volgens deze studie en de definitiestudie baggerspecie (Harmsen et al., 1997)

Bereikbare kwaliteitklasse	Initiële verontreinigingsklasse					
	Klasse 2		Klasse 3		Klasse 4	
	Deze Studie	Definitie-studie	Deze Studie	Definitie-Studie	Deze studie	Definitie-studie
Klasse 0		50				
Klasse 0,1	43					
Klasse 0, 1, 2				50		25
Klasse 2			59		10	
Klasse 3					11	25

4.1.5 Conclusies en aanbevelingen

- Op basis van de LAWABO-bestanden, die bij waterschappen aanwezig zijn, is het mogelijk schattingen te maken van de kwantiteit en kwaliteit van de aanwezige hoeveelheid baggerspecie. Wel zijn daarvoor extra gegevens nodig: zoals het oppervlakte water per deelgebied en de dikte van de laag baggerspecie in de waterlopen. Naarmate deze gegevens nauwkeuriger zijn (verkleinen van de schaal), neemt ook de nauwkeurigheid van de schatting toe. Op basis van de ontwikkelde methode blijkt in het ambtsgebied van het Hoogheemraadschap Uitwaterende Sluizen in Hollands Noorderkwartier ca. 10 miljoen m³ baggerspecie klasse 3 en 4 aanwezig te zijn.
- Een belangrijk deel van de klassenindeling is gebaseerd op het PAK-gehalte. Deze fractie kan met de extensieve biologische reiniging worden verbeterd. Berekend is dat 21% van de klasse 4 en 59% van de klasse 3 in aanmerking komt voor extensieve biologische reiniging. Bij 43% van klasse 2 bereikt men met biologische reiniging klasse 0 of 1 (zwarte metalen dominant).
- Bijstelling van de normstelling of beleid m.b.t. het omgaan met vervuilde baggerspecie heeft consequenties voor de berekende hoeveelheid te reinigen baggerspecie. Bij gebruik van baggerspecie als secundaire bouwstof blijkt volgens de kwaliteitsnormering van het Bouwstoffenbesluit minerale olie vaak de kwaliteitbepalende parameter.
- De aanwas van baggerspecie gaat onverminderd door. Met RIVM-modellen is berekend dat onder aanname van ongewijzigd beleid en een zelfde atmosferische depositie, in de toekomst plaatselijk nog aanwas is van baggerspecie in de kwaliteitsklassen 3 en 4.

4.2 Risico's

Verontreinigde baggerspecie is ook op de saneringslocatie in principe niet zonder risico's voor het milieu. Twee soorten risico's zijn daarbij van belang: ecologische risico als verontreinigingen via de natuurlijke voedselkringloop levende organismen bedreigen en verspreidingsrisico's als in water opgeloste verontreinigingen uitspoelen naar de bodem, grond- en oppervlakte water. De risico's zijn in een bioassay met regenwormen en in het veld onderzocht.

4.2.1 Ecologische risico's

Nagegaan is of de aanwezige vervuiling van de baggerspecie met zware metalen en persistente organische verbindingen aanleiding zou kunnen geven tot ecologische risico's. Daarvoor is een bioindicator gebruikt om de bodemkwaliteit te beoordelen. Het nut van bioindicatoren is dat alle gecombineerde effecten worden gemeten in een somparameter: toxiciteit. Onzekerheden van chemische analyse spelen daarbij geen rol en daarom kan de meting van toxiciteit worden opgevat als de meest realistische benadering van risico's van verontreinigingen (Van der Waarde et al. 1998).

Er is gekozen voor gebruik van regenwormen als bio-indicator. De activiteit van regenwormen is geassocieerd met functionele bodemprocessen, zoals de organische stofafbraak. Toxische stoffen kunnen op regenwormen een nadelig effect uitoefenen doordat deze bodemdieren in nauw contact staan met de vloeibare fase van de bodem en daarmee met de biologisch beschikbare fractie van de verontreiniging. In de tweede plaats kan bodemverontreiniging leiden tot risico's van toxiciteit voor vogels en zoogdieren in het geval er sprake is van bio-accumulatie via regenwormen als schakel in terrestrische voedselketens. Om deze redenen zijn in dit onderzoek regenwormen opgenomen voor de ecologische effectmonitoring van baggerspecie.

De regenwormreproductie test is gekozen omdat de bruikbaarheid grondig is bewezen en vooral geschikt is voor de meting van toxiciteit van grond, verontreinigd met zware metalen, PAKs, olie, PCB's en DDT. In deze test is de regenworm *Lumbricus rubellus* toegepast die daarvoor vers uit het veld is verzameld en gesorteerd op lichaamsgrootte in het adulte stadium. Tot aan het moment van inzet zijn de wormen in bakken met turf opgeslagen.

Monsters van de baggerspecie zijn verzameld op de velden met 0,75 m specie zowel met als zonder wilgbeplanting. Toxiciteitstests zijn

uitgevoerd aan monsters die aan het begin van de proef zijn genomen (maart 1998) en aan het eind van het eerste jaar (oktober 1998). Ter vergelijking zijn ook monsters genomen van de oorspronkelijke bodem van het proefveld (over 40 cm). Als extra controle is een IBN-referentiegrond (KOGB) in de bioassay meegenomen om de kwaliteit van het gebruikte proefdiermateriaal te controleren.

Er zijn twee varianten voor de toediening van het voedsel toegepast. In de ene variant is luchtdroog verkruimeld elzenblad met water bevochtigd en (op het laboratorium) als een laag op de onderzochte baggerspecie aangebracht, in de andere variant is dezelfde hoeveelheid voedsel in droge vorm door de baggerspecie gemengd en daarna bevochtigd. Met de referentiegrond zijn dezelfde proefvarianten ingezet. Aan het einde van die proefperiode (32 dagen) is het lichaamsgewicht, het aantal cocons en de chemische samenstelling van de wormen gemeten. Daarnaast zijn de gehalten aan zware metalen in het substraat gemeten.

De gemiddelde verandering in het lichaamsgewicht is in figuur 6a (maart) en 6b (oktober) en het gemiddeld aantal geproduceerde cocons in figuur 7a (maart) en 7b (oktober) weergegeven.

De metingen in maart tonen een grote variatie in de toename van het lichaamsgewicht. Gemiddeld genomen bleek de verandering van het lichaamsgewicht van wormen in de baggerspecie significant te verschillen van de verandering in het lichaamsgewicht in de referentiegrond. Dit was echter alleen het geval als voedsel door substraat werd gemengd. Werd voedsel op de grond aangebracht, dan was er geen verschil.

Ook bleek dat wanneer het voedsel op het oppervlak werd aangebracht, de coconproductie in de specie gemiddeld genomen lager was dan in de referentie grond. Er was geen significant verschil als het voedsel door de grond werd gemengd.

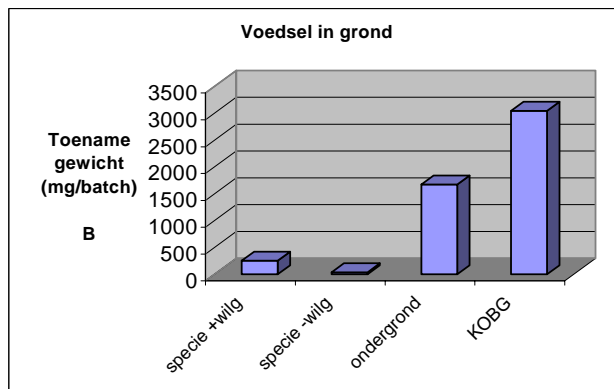
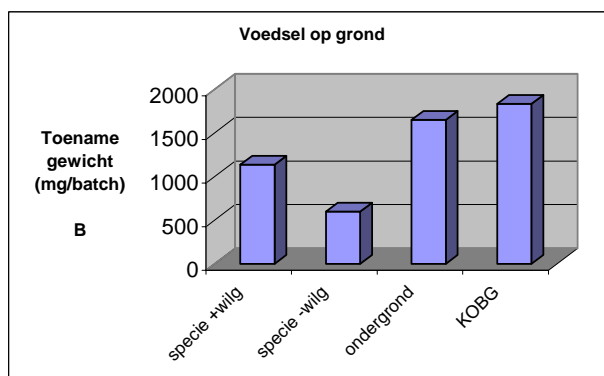
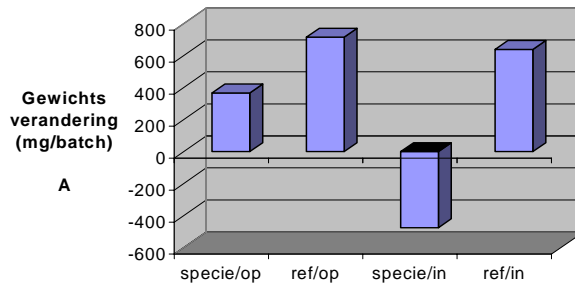


Fig 6. Gemiddelde verandering in het lichaamsgewicht van *Lumbricus rubellus* na 32 dg incubatie in baggerspecie (specie) en referentiebodem (ref). Het voedsel is als laag op het oppervlak aangebracht (op) of in het substraat gemengd (in). A – voorjaars batch, B- Najaarsbatch.

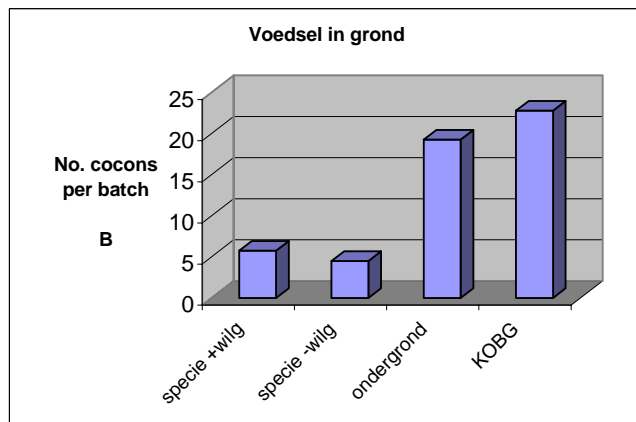
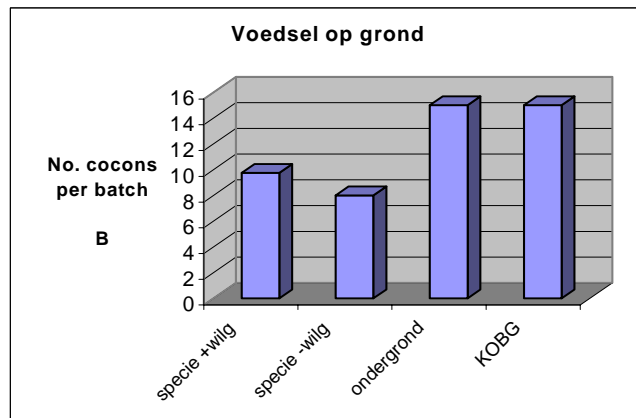
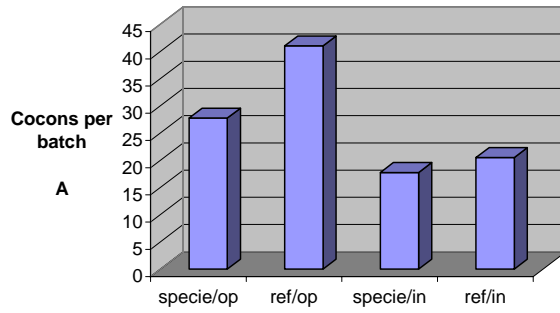


Fig. 7. Gemiddeld aantal geproduceerde cocons in batches in baggerspecie (specie) en referentiegrond (ref) met voedsel als laag op het oppervlak aangebracht (op) of in het substraat gemengd (in). A-voorjaarsbatch, B-najaarsbatch.

In de najaarsbioassay is gekeken in hoeverre de resultaten die in de uitgevoerde voorjaarsbioassay zijn verkregen reproduceerbaar waren. Tevens is nagegaan of de toxiciteit van de relatief vers gestorte specie afwijkt van specie die gedurende acht maanden in het veld een zekere rijping heeft ondergaan mede onder invloed van de inmiddels aangeplante wilgen.

De resultaten van de najaarsbioassay geven in grote lijnen een bevestiging van wat eerder in de voorjaarsbioassay is gevonden, namelijk dat de performance van de wormen in termen van groei en reproductie in de baggerspecie duidelijk lager is dan in de referentiegronden (ondergrond). Met het voedsel op het oppervlak toegediend blijkt dat de groei van de wormen in specie zonder wilg significant lager is dan de groei in de beide referentiegronden ($P < 0.01$). Door de grotere spreiding is er geen significant verschil in groei in specie met wilg ($P > 0.05$). Ook tussen specie met en zonder wilg was het verschil in groei niet significant. Indien het voedsel door de grond werd gemengd blijkt dat de groei in specie met of zonder wilg in beide gevallen significant verschilt met de groei in de ondergrond ($P < 0.01$). Voor de vergelijking met de groei in KOBG was het verschil nog sterker significant ($P < 0.001$). De groei in de ondergrond en KOBG is ook verschillend ($P < 0.01$). Tussen specie met en zonder wilg is het verschil in groei echter niet significant ($P > 0.05$), hetgeen geleet op de beperkte wortelontwikkeling van de wilg ook niet was te verwachten.

Wat betreft de coconproductie is in de bioassay met voedsel op de grond de spreiding van de gemiddelden dermate groot dat deze onderling niet significant van elkaar verschillen ($P = 0.108$). Echter menging van voedsel door de grond leverde wel significante verschillen op. De coconproductie in specie met of zonder wilg is gemiddeld lager dan in de ondergrond ($P < 0.01$) of in KOBG ($P < 0.001$). Ook hier is er geen verschil in coconproductie in specie met en zonder wilg en tussen de ondergrond en KOBG ($P > 0.05$).

De resultaten van de najaarsbioassay zijn in overeenstemming met wat eerder in de voorjaarsbioassay is gevonden. Mortaliteit is in geen van de uitgevoerde bioassays waargenomen, zodat gesproken kan worden van sub-letale effecten die indien deze situatie zou blijven bestaan op termijn de populatieontwikkeling van regenwormen in de specie in negatieve zin zou kunnen beïnvloeden. Niet uitgesloten moet worden dat

andere factoren zoals de matig ontwikkelde bodemstructuur in de baggerspecie en het gelijktijdig naast elkaar voorkomen van aërobe en anaërobe situaties effect hebben. De keuze van de referentiegrond is dus van essentieel belang.

Het onderzoek vond plaats binnen acht maanden na het storten van de specie. Het zal duidelijk zijn dat voor het doen van uitspraken op de langere termijn het uitvoeren van een vervolgmonitoring noodzakelijk zal zijn.

Uit chemische analyse van lichaamsweefsel van de worm, blijkt dat het gehalte van Cd, Cr, Ni en As niet verhoogd is vergeleken met het gehalte in wormen in de referentiegrond. De gehalten van Cu, Hg, Pb en Zn zijn wel verhoogd, zij het zeer gering. Accumulatie van metalen waarbij kans op doorvergiftiging bestaat, is niet waargenomen (Ma, 1998).

4.2.2 Verspreidingsrisico's

Men spreekt van verspreidingsrisico's als verontreinigingen in opgeloste vorm uitspoelen en in het grond- en oppervlaktewater terecht komen. Monitoring van deze compartimenten is dan ook voorgeschreven in de vergunning. De omstandigheden op de Eurojoule locatie zijn gunstig. De bodem bestaat uit een zware zavel, met ca 3% organische stof, een CEC van 14,3 eq/kg d.s. en een pH van 8. Het organische stof gehalte is hoog genoeg voor een natuurlijke bodemisotatie (Harmsen et al., 1996). De hoge CEC en pH garanderen een zeer geringe mobiliteit van zware metalen. Bovendien ligt de locatie in een kwelgebied waardoor het grondwater in principe niet bedreigd wordt. Het water uit de specie wordt gecontroleerd afgevoerd via de drains naar een verzamelsloot.

Metingen voor het vaststellen van verspreidingsrisico's zijn verricht in:

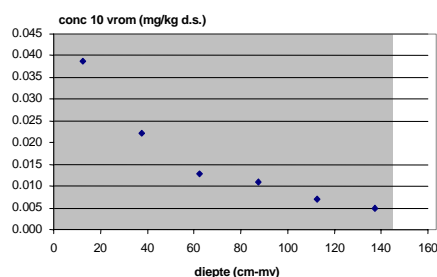
- de specie;
- de bodem direct onder de specie;
- het poriewater in de specie;
- het poriewater direct onder de specie;
- het drainagewater;
- het slootwater;

De gehalten in de ondergrond zijn vooraf aan het aanbrengen van de baggerspecie en aan het einde van het eerste jaar gemeten. (oktober 1998).

In specie, bodem en water zijn de PAK's en minerale olie gemeten. Zware metalen mogen in een licht verhoogd gehalte (klasse 2) in de specie voorkomen. Bij de keuze van bemonsteringssystemen is rekening gehouden

met adsorptie van de contaminanten aan verschillende materialen.

Omdat niet alleen de concentratie in het water bepalend is voor het risico, maar ook de hoeveelheid verplaatst water, zijn alle termen van de waterbalans bepaald. Het onderzoek aan verspreiding is uitgevoerd op de velden 2 en 3 (zie fig. 1) met resp. 0,25 en 0,50 m specie.



Figuur 8 Verloop PAK-concentratie in de oorspronkelijke ondergrond.

Resultaten

In de oorspronkelijke ondergrond blijkt het PAK-gehalte met de diepte af te nemen. Dit duidt op een antropogene herkomst van de PAK, die via atmosferische depositie of sedimentatie voor inpoldering van de Wieringermeer is afgezet. (figuur 8).

Tabel 7 Gehalten aan PAK en zware metalen in de specie en in de ondergrond

	Oorspronkelijke specie	Ondergrond		
		Okt 97	25 cm veld Okt 98	50 cm veld Okt 98
PAK (10 VROM) in µg/kg d.s.	54.000	38	105	387
Zware metalen (mg/kg d.s.)				
Cadmium	0,70	0,36	0,33	0,39
Lood	115	10,2	10,9	10,7
Nikkel	14	13,6	14,9	13,8
Koper	44	7,6	8,3	7,4
Zink	238	43,8	42,7	41,9
Chroom	31	25,2*	35,3	33,5

*Uitschieter, gehalte is 35 à 40 mg/kg d.s. in diepere lagen

Tabel 8 In water opgeloste gehalten PAK en zware metalen

	Specie	Ondergrond*		Drain	Sloot	Referentie	
		10 cm	30 cm			Grondwater	Sloot
PAK (10 VROM) in µg/l	0,048	0,046 0,225	0,0454 0,074	0,05 0,11	0,1		
Zware metalen in µg/l							
<i>Cadmium</i>	<0,1	<0,4 <0,4	<0,4 <0,4	0,7	<0,1-4	3	0,3
<i>Lood</i>	<1,0	<1 <1	<1 <1	3,6	<1-6	<10	8
<i>Nikkel</i>	2,3	2 3	3	20	15	14	20
<i>Koper</i>	14	2-29 2-180	4-15 5-380	17	3-10	5-10	10
<i>Zink</i>	430	90-150 500-1500	120-190 500-1700	8,7	2-23	30-210	10
<i>Chroom</i>	3,5	3 3	3 3	6,4	3 3	<1	4

*Eerste meting februari 1998, tweede meting september/oktober 1998

De concentratie zware metalen is gemeten tot een diepte van 1 meter en blijkt constant. Dit wijst er op dat het bodemgebruik niet heeft geleid tot een verhoogde concentratie en dus kunnen deze gehalten als natuurlijke achtergrondwaarden worden beschouwd. Het gehele najaar van 1998 was zeer nat en tijdens de bemonstering in oktober was de specie met water verzadigd. Daardoor was het tijdens de bemonstering van de ondergrond niet te vermijden dat de monsters in aanraking kwamen met de natte specie. Omdat de PAK-gehalten in de specie in tegenstelling tot de gehalten aan zware metalen, relatief hoog zijn, heeft dit contact het PAK-gehalten in monsters van de ondergrond vermoedelijk beïnvloed, deze bleken verhoogd. De totale gehalten aan zware metalen bleken daarentegen niet verhoogd (tabel 7). In de baggerspecie zijn de gehalten van lood koper en zink hoger dan in de ondergrond.

Het gehalte van enkele zware metalen in het bodemvocht onder de baggerspecie in sept./okt 1998 ten opzichte van de gehalten in feb. 1998 was duidelijk verhoogd (tabel 8). Met name gold dit voor de elementen koper en zink. In tabel 8 zijn de gemeten waarden als een range weergegeven.

De oorzaken van de gemeten verhoging zijn nader onderzocht. Daarbij is naar voren gekomen dat de verhoging van koper mogelijk het gevolg is van corrosie van koperen leidingen van de bemonsteringsapparatuur voor PAKs door het voor koper agressieve grondwater in de buurt van de bemonsterings-cups.

In het algemeen geldt dat de concentratie van zware metalen in het bodemvocht hoofdzakelijk wordt bepaald door het evenwicht tussen de bodemgebonden fractie en de fractie in oplossing. In mindere mate spelen zeer slecht oplosbare verbindingen een rol. Dit evenwicht hangt samen met:

- het percentage klei en organische stof (verantwoordelijk voor de binding aan de bodem);
- parameters in de bodemoplossing zoals pH, calcium-gehalte, aanwezigheid van diverse zouten en opgeloste organische stof.

Gebleken is dat in vergelijking met de oorspronkelijke situatie (geen specie) het zoutgehalte meer dan verdubbeld is, het calciumgehalte verviervoudigd, water dat vanuit de specie in de ondergrond komt een lagere pH heeft (7,4 i.p.v. 8) en de CO₂-

spanning is verhoogd, wat op zich al een verlaging van de pH bewerkstelligt. Niet al deze parameters zijn gekwantificeerd: de veranderingen in het gehalte opgelost organisch stof is niet gemeten. Uit berekeningen blijkt dat deze factoren gezamenlijk de oplosbaarheid met een factor 2 tot 8 verhogen.

Aangezien de concentratie in het bodemvocht in de specie lager is dan in de ondergrond en de absolute gehalten in de ondergrond zelf niet zijn verhoogd, kan dus worden aangenomen dat de waargenomen verhoging in het bodemvocht uitsluitend moet worden toegeschreven aan een verschoven evenwicht. De toegenomen concentratie is dus niet het gevolg van uitloging van de baggerspecie. Het effect is dat de van nature aanwezige zware metalen over een zekere bodemcompartiment worden herverdeeld. De omvang van de herverdeling wordt bepaald door de hoeveelheid zouten in de baggerspecie en de verandering van de pH van het bodemvocht. Zodra de overmaat aan zouten is uitgespoeld stopt de herverdeling. Deze kent een piek die vervolgens uitdooft. Onzeker is of de verplaatsing die gepaard gaat met de herverdeling ook invloed zal hebben op de kwaliteit van het drainage water.

Het neerslagoverschot dat via de baggerspecie en de ondergrond door drains wordt afgevoerd, wordt gemengd met de kwelstroom waarin een zekere natuurlijke concentratie van zware metalen voorkomt. Er vindt een verdunning plaats die volgens de waterbalans een factor 3,4 bedraagt. (tabel 9).

Tabel 9 Waterbalans 25 cm veld, periode 1 november 1997 tot 1 oktober 1998

	Hoeveelheid water in mm
Neerslag (gemeten) A	907
Bergingsverandering in de specie (gemeten) B	47
Verdamping (berekend) C	419
Afvoer uit specie D = A-B-C	441
Afvoer drain (gemeten) E	1480
Kwel F = E-D	1039
Verdunning drainafvoer E/D	3,4

4.2.3 Conclusies en aanbevelingen

Uit het verspreidingsonderzoek kan worden geconcludeerd:

- Door het bestaan van kwel is er geen risico voor het grondwater. Grondwater wordt samen met het overvloedige neerslag naar een verzamelsloot afgevoerd;
- In deze sloot en in het water uit de drains

- is geen verhoging van PAK- en zware metalengehalten waargenomen;
- Meting van verandering in contaminant gehalten direct onder de baggerspecie levert het snelst informatie over verspreidingsrisico's. Contact tussen monsters uit de ondergrond en baggerspecie kan een onjuist beeld opleveren zoals in het natte najaar 1998 is gebleken;
 - Het meten van alleen gehalten in het bodemvocht kan als gevolg van verschoven evenwichten ten onrechte leiden tot de conclusie dat uitloging van baggerspecie optreedt.
 - Om alle effecten te beoordelen dient ook de herverdeling van de van nature aanwezige stoffen in de bodem in aanmerking te worden genomen. Als gevolg van verhoogde zoutgehalte en verlaagde pH kan het evenwicht (tijdelijk) worden verstoord in de richting van de opgeloste fractie.

4.3 Verloop biologische reiniging

Het onderzoek naar de biologische reiniging is uitgevoerd op laboratorium en veldschaal. Op het laboratorium is de potentiële mogelijkheid voor afbraak onderzocht. In het veld is vervolgens nagegaan in hoeverre de daar heersende omstandigheden geschikt waren voor het verkrijgen van biologische afbraak. Belangrijk hierbij was de weersgesteldheid.

4.3.1 Uitgangssituatie

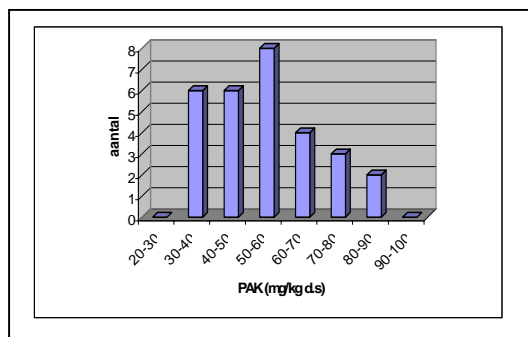
Uit eerder onderzoek (SC-DLO, 1997) is gebleken dat een goed inzicht in de beginsituatie erg belangrijk is om later goede conclusies te kunnen trekken. Met name de gehalten van PAK en olie tonen een grote spreiding. Om betrouwbare conclusies te kunnen trekken uit het verloop van afbraak, die in het stadium van extensieve reiniging gering is, moeten voldoende aantallen monsters worden genomen. Voor statistisch betrouwbare uitspraken is behalve een gemiddelde waarde ook de spreiding (standaard deviatie) van belang. Om statistisch betrouwbaar afbraak te kwantificeren moet het aantal monsters worden afgestemd op de spreiding. Voor PAK en olie is deze in het algemeen groot, zodat strikt genomen volgens de benadering van Stein & Staritsky, 1995, minstens 50 monsters per te vergelijken geval nodig zijn. In de praktijk wordt hiermee pragmatisch omgegaan door op de velden wel veel steekmonsters te nemen, maar de analyses af te stemmen op gevonden spreiding. Daarmee wordt vaak met minder te analyseren monsters voldaan aan de door de statistiek gedichteerde nauwkeurigheid. Uit de intensieve bemonstering direct na het aanbrengen van de specie in het 75 cm veld is gebleken dat de aangebrachte specie relatief homogeen is en er geen significant verschil in gehalten is gevonden tussen de velden en

verschillende dieptes. Uit de frequentieverdeling voor minerale olie (fig. 9B) blijkt dat het maximum van de metingen ligt tussen de 700 en 800 mg/kg d.s. minerale olie. Er zijn echter ook uitschieters met twee tot driemaal dit gehalte. Gemiddeld is het oliegehalte 861 mg/kg/ d.s. met een standaard afwijking van 384 mg/kg d.s.

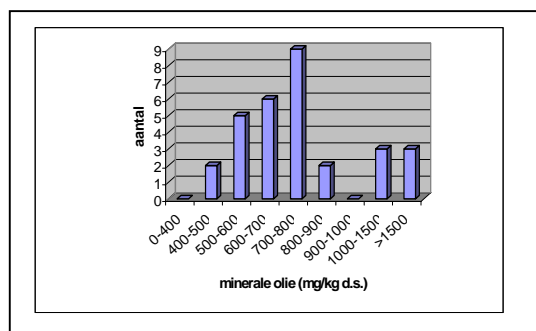
Voor PAK is het aantal uitschieters minder groot. De meeste monsters liggen rond de 50 mg/kg d.s PAK (fig. 9A). Het gemiddelde is 54 mg/kg d.s. en de standaardafwijking is 15 mg/kg d.s.

4.3.2 Afbraakpotentieel

Onder geoptimaliseerde condities is met batchincubatietesten nagegaan wat de afbreeksnelheid is van minerale olie en PAK van de al ontwaterde baggerspecie (Bioclear, 1998). Op basis van de CO₂ productie kon hierbij worden geconcludeerd dat er voldoende biologische activiteit was (ca. 2000 mg/kg d.s. CO₂-C in 42 dagen). M.b.t. de afbraak van minerale olie zijn er duidelijke verschillen tussen batchincubaties uitgevoerd in monsters genomen direct na het aanbrengen van de specie (december 1997) en die zijn uitgevoerd in monsters genomen in het najaar van 1998



A



B

Figuur.9 Frequentieverdeling voor het minerale oliegehalte (B) en PAK-gehalte (A) in de ontwaterde baggerspecie bij aanvang van het experiment ($T = 0$). Veld met 75 cm specie.

Tabel.10 Minerale oliegehalten en 95% betrouwbaarheidsinterval (mg/kg d.s.) gemeten bij de afbreekbaarheidstoets middels batchincubaties (n = 6)

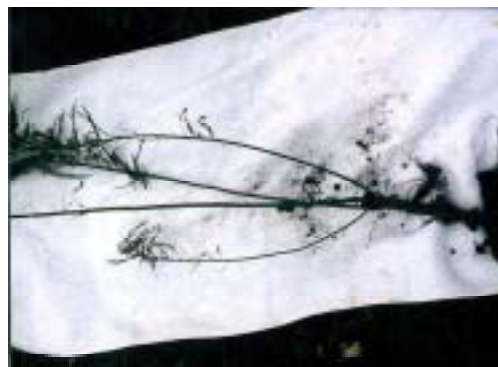
Monster	Start	Einde
Dec. '97	733 ± 69	523 ± 162
Okt. '98	677 ± 172	307 ± 61

De afbraak die in een batch test wordt gemeten is een maat voor de afbraak die in een seizoen mag worden verwacht. Deze test geeft dus een soort seizoensbeschikbaarheid weer. Volgens metingen in dec. 1997 mocht geen significante afbraak van minerale olie worden verwacht in 1998. Dezelfde test, maar nu uitgevoerd op monsters die in oktober 1998 zijn genomen, laten een iets lagere gemiddelde gehalte zien dan in dec. '97 (maar niet significant lager). Aan het einde van de batchtest zijn de gehalten gedaald en deze daling is significant (tabel 10). Dat betekent dat in het seizoen 1999 een significante afbraak van minerale olie mag worden verwacht van ca. 300 mg/kg d.s. De doorgaande rijping in 1998 lijkt een positief effect te hebben op de biologische beschikbaarheid. De batchproeven gaven aan dat noch in 1998 noch in 1999 een significante afbraak van PAKs zou plaats vinden. De metingen in de veldsituatie dienen om deze verwachtingen te verifiëren.

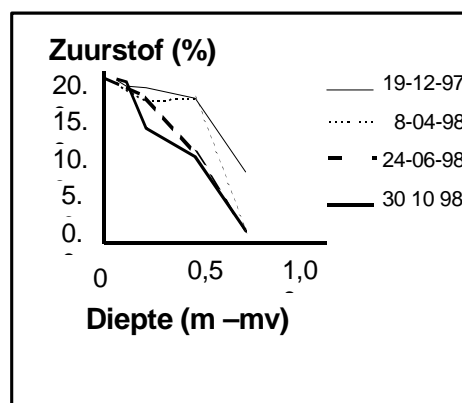
4.3.3 Afbraakcondities

De specie die in december 1997 werd aangebracht was in een reeds ver gerijpte staat. De specie was goed beloofbaar en redelijk droog. Dat is het hele jaar zo gebleven, ondanks de neerslag in 1998. Dit betekent dat de specie vanaf het begin van aanbrengen goed doorlatend was. Bij het graven van een profielkuil in de maanden maart, en april bleek de bovenste 20 cm van de specie mooi gerijpt en rul was. Daaronder bevond zich een overgangslaag van deels aërobe, deels anaërobe specie die vrij vochtig was. Hier en daar kwamen in de specie schijngrondwaterstanden voor. Deze situatie is een groot deel van het jaar zo gebleven. Alleen na de redelijk droge meimaand was de situatie iets beter en strekte de aërobe laag zich uit tot 40 cm -mv. Door de natte maanden maart en april kon de wilg pas in mei worden aangeplant. De wilg had in het begin veel last van het massaal groeiend onkruid, dat zich vanaf begin april begon te ontwikkelen. Na verschillende malen mechanische onkruidbestrijding stond er eind juni een redelijk gewas wilg. Het gewas heeft in de tweede helft van het jaar ernstig te leiden gehad van vraat. Wel leken de wilgen in de specie zich wat beter te ontwikkelen. De

beworteling van de wilg was in september nog erg minimaal met wortel lengtes van 5-10 cm. Door de beperkte wortelontwikkeling kon geen onderscheid worden gemaakt tussen velden met en zonder wilg (zie foto)



In de ontwaterde specie waren direct na het aanbrengen al grote poriën aanwezig, waardoor zuurstofdiffusie tot aan de oorspronkelijk bodem mogelijk was. Binnenin de grote aggregaten was nog sprake van anaërobie. Gaande van boven naar beneden was een afname van het zuurstofgehalte waarneembaar. Verwacht werd dat in 1998 als gevolg van verdere rijping het zuurstofgehalte in de diepere lagen zou toenemen. Door de natte weersgesteldheid is dit niet bewaarheid. (figuur.10).



Figuur.10. Zuurstofconcentratie in gasgevulde poriën in het 75 cm veld

Zuurstof wordt in de bodem verbruikt bij diverse ademhalingsprocessen waarbij kooldioxide wordt gevormd. Het verloop van het zuurstofgehalte met de diepte geeft aan dat er ademhaling is en verder dat de diffusiemogelijkheden voor aanvulling van het zuurstoftekort beperkt zijn (weinig lucht gevulde poriën). In de gasfase kan bij aanwezigheid van anaërobe processen H₂S en CH₄ voorkomen. In de aërobe zone kunnen deze gassen oxideren (vaak door biochemische processen).

Het ammoniumgehalte in de waterfase van de specie was ca 3 mg-N/kg d.s. met uitschieters tot 50 mg-N/kg d.s. Nitraat en fosfaat gehalten waren laag of niet aantoonbaar (<3,2 mg-N/kg d.s. en <1,7 mg-PO₄/kg d.s.). Deze gehalten weerspiegelen het naast elkaar voorkomen van aërobe en anaërobe processen. In aërobe delen geproduceerd nitraat wordt in anaërobe delen als elektronenacceptor gebruikt. Door oxidatie van ijzer(II) in de aërobe zone wordt fosfaat vastgelegd. In zo'n situatie kunnen geen valide uitspraken worden gedaan over de bemestingstoestand. Afgaande op de groei van de wilg en de kruiden lijkt de bemestingstoestand redelijk te zijn.

De gemeten redoxpotentiaal bevestigt het gelijktijdig voorkomen van beide processen (fig. 11).

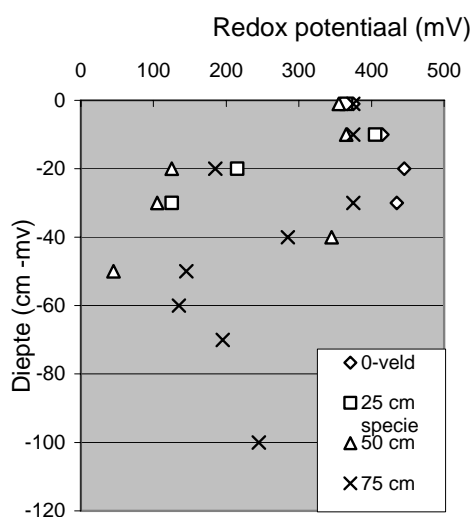


Fig. 11 Redoxpotentiaal (mV) op verschillende dieptes in verschillende velden (sept. 1998)

In het algemeen geldt dat volledig aërobe omstandigheden bestaan bij een redoxpotentiaal groter dan 450 mV. Bij een potentialen kleiner dan 330 mV is zuurstof niet

meer aantoonbaar aanwezig. IJzer begint te reduceren bij waarden kleiner dan 150 mV en sulfide verbindingen ontstaan uit sulfaten bij redoxpotentialen onder -50 mV. Uit metingen blijkt echter dat op de meeste velden zuurstof aantoonbaar aanwezig is in de specie tot 50 à 75 cm. Dit is alleen te verklaren door de aanwezigheid van relatief grote scheuren en betrekkelijk grote bodemaggregaten. Het zuurstofgehalte varieert van ~0% tot 18% in de laag van 0,5 - 0,75 m -mv en van 10 tot 20% in de laag tot 0,5 m -mv. Het minimum luchtgehalte is ca. 0,05 m³.m⁻³.

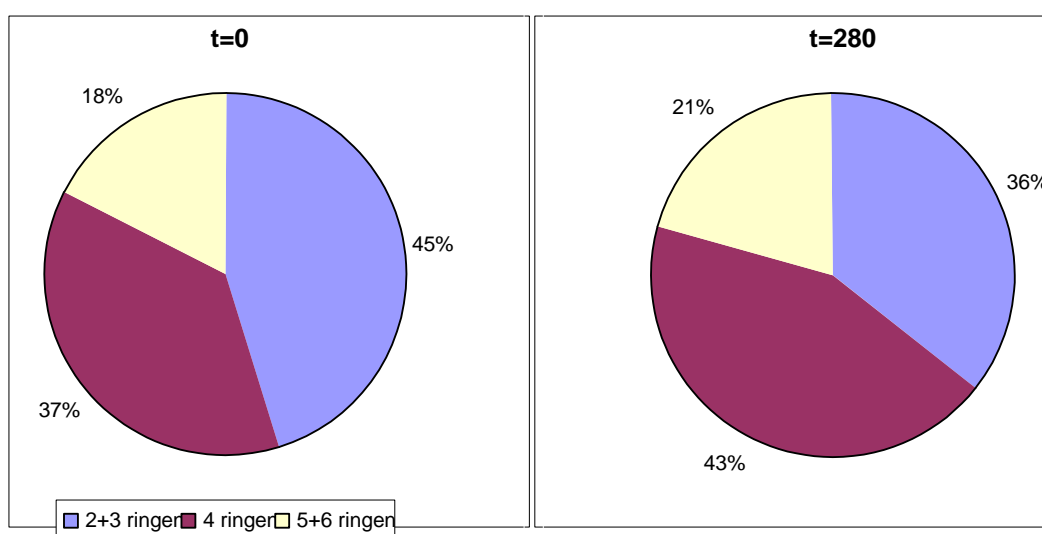
4.3.4 In situ afbraak PAK en minerale olie

Voor het vaststellen van afbraak van PAK en minerale olie is intensief bemonsterd op de velden met 75 cm specie (tabel.11). Er is geen significante afname van het totaal PAK-gehalte geconstateerd. Het gemiddeld gehalten aan minerale olie lijkt wel af te nemen, maar is gelet op de spreiding niet significant. Deze observaties sporen geheel met de uitgevoerde laboratorium testen (batchproeven) die ook geen significante afname voorspelden in het seizoen 1998. De toets of de voorspelde afname van minerale olie in de batchproeven met specie van oktober 1998 ook klopt met de in situ meting, kan pas aan het eind van het seizoen 1999 worden gemeten.

Het gehalte van PAKs is in het seizoen 1998 niet significant veranderd en men zou kunnen concluderen dat er geen afbraak heeft plaats gevonden. Wel is gebleken dat de samenstelling van de PAK duidelijk is veranderd. (figuur.12). De fractie lichtere PAK (2 en 3 ringen) is beduidend kleiner geworden. De lichtere PAK zijn de makkelijkst afbreekbare PAK. Deze verandering duidt juist wel op afbraak

Tabel.11 PAK-gehalten (10 VROM in mg/kg d.s.) en minerale olie (mg/kg d.s.) in baggerspecie in 1998

PAK		t = 0 (n=5)		t = 122 (n=5)		t = 142 (n=1)
Veld	Diepte	Gem	sdv	Gem	Sdv	
75 cm met wilg	0-25	45	6	49	8	57
	30-60	60	20	54	12	48
	60-90	52	16	52	12	37
75 cm Zonder Wilg	0-25	62	16	46	7	63
	30-60	57	20	55	14	56
	60-90	50	7	56	10	71
	<i>Gemiddeld</i>	<i>54</i>	<i>15</i>	<i>52</i>	<i>11</i>	<i>55</i>
Minerale olie		t = 0 (n=5)		t = 122 n=5)		t=142 (n=1)
Veld	Diepte	gem	sdv	Gem	Sdv	
75 cm met wilg	0-25	859	305	934	40	481
	30-60	1227	741	849	116	439
	60-90	1074	576	975	58	534
75 cm Zonder Wilg	0-25	728	127	805	71	483
	30-60	640	118	571	109	601
	60-90	623	105	567	50	592
	<i>Gemiddeld</i>	<i>861</i>	<i>384</i>	<i>784</i>	<i>74</i>	<i>521</i>



Figuur 12 Verdeling over verschillende fracties van de PAK bij aanvang van de experimenten en na 280 dagen

4.3.5 Conclusies en aanbevelingen

- In het onderzoek is gebruik gemaakt van gedeeltelijk ontwaterde baggerspecie. De uitgangstoestand van het uitgangsmateriaal (PAK en minerale olieconcentraties, afbraakcondities zoals aëratie, redox enz.) zijn goed vastgelegd

en vormen een goede basis voor het volgen van biologische afbraak in de komende jaren;

- 1998 was een zeer nat jaar, waardoor de zuurstofvoorziening sub-optimaal is geweest;
- In de specie komen zones voor waarin

aërobe en anaërobe processen naast elkaar voorkomen;

- Voor 1998 was noch voor PAKs, noch voor minerale olie een significante afbraak voorspeld in laboratorium batchproeven. In situ metingen hebben dit bevestigd. Voor 1999 wordt voor minerale olie wel een significante afbraak verwacht, voor PAKs niet. Bevestiging hiervan kan pas aan het eind van het seizoen 1999 worden verkregen. Voorlopig is geconcludeerd dat de batchproeven een goede indicatie geven van het afbraakpotentieel in het komend seizoen.
- Parallel aan dit onderzoek heeft er onderzoek plaatsgevonden naar het karakteriseren van de biobeschikbaarheid (Cornelissen, 1999; Doddema et al., 1998 en Harmsen et al., 1999). De hier

opgedane kennis dient toegepast te worden in dit onderzoek, omdat op basis van gemeten biobeschikbaarheid het mogelijk is te voorspellen hoe snel de afbraak zal plaatsvinden.

- Hoewel het totaal gehalte aan PAKs niet significant is afgenomen, kon toch een verschuiving in de PAK-samenstelling worden waargenomen, hetgeen duidt op (geringe) afbraak.
- Op basis van de veldsituatie is geconcludeerd dat de reiniging nu al in de extensieve fase is. Voor het vaststellen van het verloop van de afbraak kan met intervallen van een jaar worden volstaan, waarbij wel de afbraakcondities gemeten dienen te worden (SC-DLO, 1997).

4.4 Interactie wilg-baggerspecie

Een van de vragen die in dit onderzoek opgelost moet worden is welke invloed planten hebben op het verloop van de biologische afbraak. Het gaat daarbij om de beïnvloeding van rijping van de nog natte baggerspecie en omstandigheden die gunstig zijn voor de afbraak van PAKs en olie. Op basis van empirisch onderzoek kan deze invloed pas na ettelijke jaren worden vastgesteld. Het onderzoek is procesgericht opgezet zodat al na een jaar het belang van planten tot op zekere hoogte gekwantificeerd kan worden.

4.4.1 Karakterisering rijping

Rijping is een bodemvormingsproces dat volgt op de ontwatering van de natte specie. Tijdens ontwatering consolideert de specie. Vanaf het moment waarop lucht in de specie dringt spreekt men van rijping. Het watergehalte neemt ook dan nog verdere af en het luchtgehalte neemt toe (fysische rijping). Tegelijkertijd beginnen chemische en biologische processen op gang te komen die kenmerkend zijn voor aërobe omstandigheden (chemische en biologische rijping).

Bij fysische rijping, gaat natte en nog slappe bagger met een laag volume gewicht door indroging over in een droge stevig grond met een aanzienlijk toegenomen volume gewicht. Vooral in kleihoudende en (veel) organische stof bevattende bagger ontstaan scheuren en neemt het volume aanzienlijk af. Volume reducties van 50 tot 70% zijn niet ongewoon.

Tabel 12 Classificatie van de rijpingsfactor *n* volgens Pons en Zonneveld (1965).

n-factor	Classificatie	Omschrijving
< 0,7	Gerijpt	Kleeft niet aan de handen, niet kneedbaar
0,7 – 1,0	Vrijwel gerijpt	Vrij stevig, kleeft een beetje, niet gemakkelijk kneedbaar
1,0 – 1,4	Half gerijpt	Redelijk zacht, kleeft, gemakkelijk kneedbaar
1,4 – 2,0	Vrijwel ongerijpt	Zacht, kleeft erg, zeer gemakkelijk kneedbaar
> 2,0	Ongerijpt	Zeer slap, bijna vloeibare modder

Na uitdroging neemt bagger weer water op en neemt het volume toe (zwellen). Het maximaal volume van voor de rijping wordt niet meer bereikt (irreversibele indroging).

De mate van rijping wordt aangegeven met een rijpingsfactor die normaliter ligt tussen 0,7 voor goed gerijpte grond en groter dan 2 voor ongerijpte grond (tabel 12).

De rijpingsfactor houdt verband met het vochtgehalte bij volledige verzadiging en dat hangt weer samen met het gehalte aan klei en organische stof. De aard van de organische stof heeft ook nog een zekere invloed. Via deze samenhang beschikken we over de mogelijkheid om van tevoren te bepalen hoeveel water uit baggerspecie moet verdwijnen voor een bruikbare grond is verkregen. Die hoeveelheid hangt uiteraard samen met het aanvankelijk verzadigd vochtgehalte.

In figuur 13 is aangegeven hoeveel water irreversibel moet worden onttrokken aan baggerspecie met 15% lutum (delen < 2 µm) en verschillende organische stof gehalten, voor volledige rijping is bereikt. Uit deze figuur valt af te lezen dat dit ca. 40 gram water per 100 gram droge stof is bij een baggerspecie met een aanvankelijk rijpingsgetal 2 en 5% organische stof en ca. 20 gram water bij een organische stofgehalte van 1% (fig. 13)

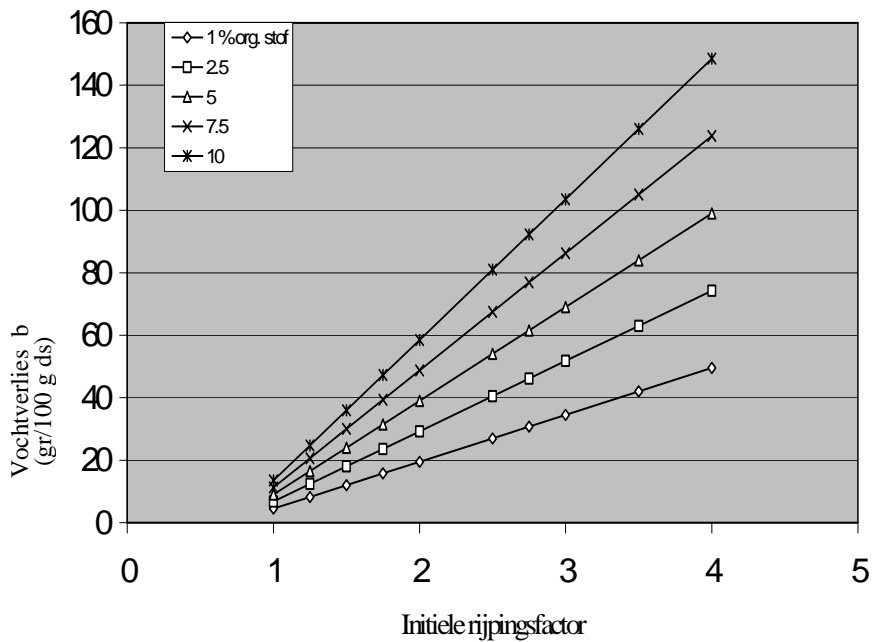


Fig. 13 Vereist vochtverlies voor volledige rijping van een grond met 15 % lutum

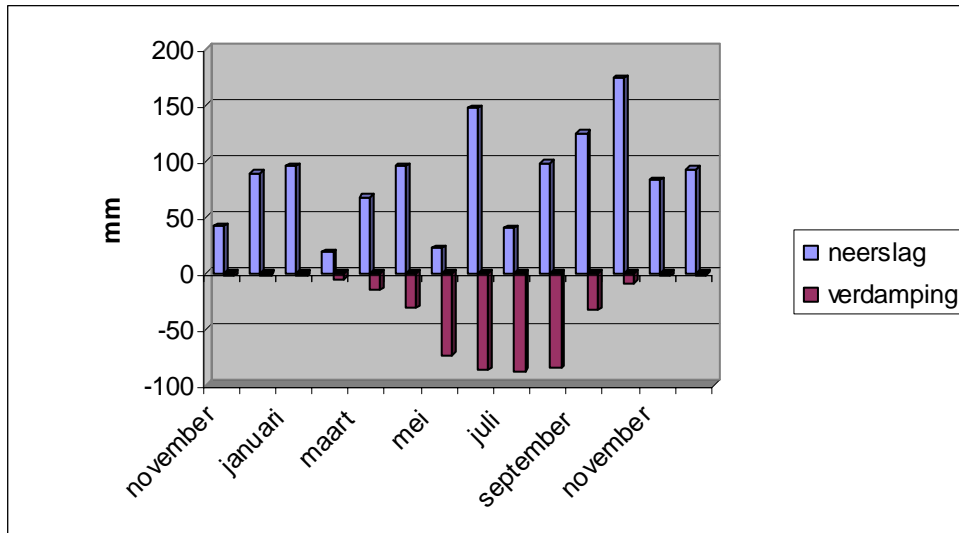
4.4.2 Weersgesteldheid

Voor een goed verloop van het reinigingsproces is een snelle ontwatering en rijping van belang. Deze processen zijn immers sturend in het ontstaan van aërobie. Regen is nadelig, terwijl perioden zonder neerslag en veel zon gunstig zijn. De weersgesteldheid is dan ook vaak van doorslaggevend betekenis voor het verloop van de rijping. Het jaar 1998 was wegens z'n overvloedige regenval dan ook geen topjaar. In de periode december 1997 tot 15 oktober 1998

viel er op de Oostwaardhoeve 865 mm regen tegen normaal 712 mm. Na de meetperiode is tot eind december nog 294 mm gevallen. In tabel 13. zijn de algemene weerkenmerken van het jaar weergegeven. Verdamping vindt vooral in de zomer plaats (figuur 14). Het neerslagpatroon was echter zodanig dat ook in de zomer droge perioden werden afgewisseld door zeer natte perioden, waarin het vochttekort volledig kon worden aangevuld.

Tabel 13 Algemene kenmerken van het weer gedurende de meetperiode

Maand	Algemene kenmerken van het weer
November 1997	Zacht, droog en aan de zonnige kant
December 1997	Zacht, normale hoeveelheid zon en neerslag
Januari 1998	Zacht, zonnig en aan de natte kant
Februari 1998	Zeer zacht, zeer zonnig en droog
Maart 1998	Zeer zacht, nat en somber
April 1998	Zacht, zeer nat en zeer somber
Mei 1998	Zeer warm, droog en aan de zonnige kant
Juni 1998	Extreem nat, somber en aan de warme kant
Juli 1998	Koel, somber en aan de droge kant
Augustus 1998	Aan de zonnige kant normale temperatuur, gemiddelde hoeveelheid neerslag
September 1998	Warm, zeer nat en somber
Oktober 1998	Zeer nat, zeer somber en aan de koude kant



Figuur 14 Neerslag en verdamping op Oostwaardhoeve in de periode november 1997 tot november 1998

4.4.3 Gemeten rijping

4.4.3.1 Ingeplante ontwaterde bagger

In het onderzoek is steekvaste baggerspecie aangebracht met een gemiddelde rijpingsfactor van 1,11. Aan het einde van het groeiseizoen bleek dat de rijping was voortgeschreden, zelfs tot een diepte van 0,9 m (fig. 15). De rijping is in de bovenste 10 cm echter groter dan in de daaronder liggende lagen. Dat kan worden toegeschreven aan een grotere

wateronttrekking op geringe diepte dan op grotere dieptes. Diverse kruiden hebben zich tussen de wilg uitbundig ontwikkeld. De beworteling bleef beperkt tot hooguit enkele decimeters, waardoor de diepte waarop water is onttrokken beperkt is gebleven, hetgeen de grotere rijping in ondiepe lagen verklaart. De rijping op het veld met 0,25m baggerspecie is geringer dan op de overige velden.

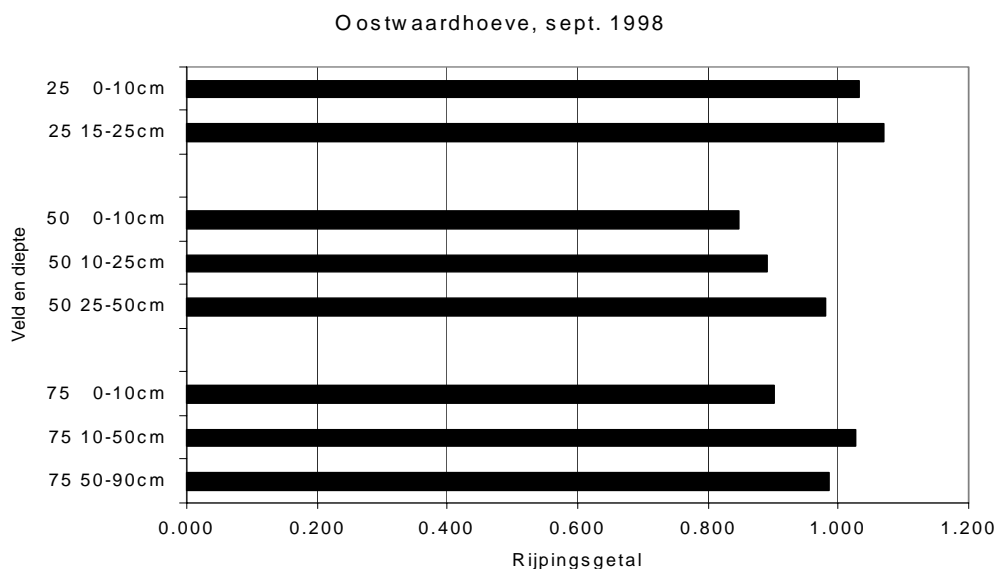


Fig. 15 Rijpingsgetal van ontwaterde baggerspecie in sept. 1998 (uitgangstoestand, feb. 1998: 1,11)

Dit verschil is het gevolg van de overvloedige regenval (530 mm in april t/m september), die

slechts een keer per 20 jaar groter is. Op de overgang tussen de baggerspecie en de

oorspronkelijke ondergrond bevindt zich een laag waarin resten van een groenbemester worden aangetroffen. Visueel is de indruk gekregen dat deze laag de afvoer van water remt. Op het veld met 0,25 m baggerspecie kan dat vaker tot stagnatie van afvoer leiden wegens het geringer waterbergend vermogen dan bij de dikkere lagen. Uit de verandering van de rijpingsfactor is afgeleid dat aan de bagger op het veld met een laagdikte van 0,50 m ca 35 mm water irreversibel is onttrokken en ca. 40 mm op het veld met 0,75 m bagger.

4.4.3.2 Natte bagger tussen wilg

In de nat opgebrachte specie van de toedieningsvariant (25; 50 en 100cm) zijn in 1998 scheuren ontstaan. Hierdoor kon afvoer van het overtollig water naar de ondergrond plaatsvinden. De specie bleef tussen de scheuren volledig anaëroob. De wilgen in de toedieningsvariant hebben zich goed ontwikkeld. Nieuwe beworteling in de specie vond plaats direct rond de wilg in een straal van 10 tot hooguit 20 cm. Verdere structuurverbetering en grotere aërobie wordt in 1999 verwacht.

Een indicatie voor de hoeveelheid water die is afgevoerd via drainage en verdamping en die ten goede is gekomen aan de rijping volgt uit het verschil in watergetallen in februari en september. In deze berekening is de droge volumedichtheid van de specie nodig. Deze is ca. $1,0 \text{ g.cm}^{-3}$ en is gebaseerd op de gemeten volumedichtheid van de monsters voor de verdampingsmethode en de dichtheid is berekend uit soortelijke massa van de vaste

delen van de specie en het poriënvolume berekend uit het watergetal. Uit de globale berekening blijkt dat bij de '50' velden ca. 32 mm en bij de '75' velden ca. 41 mm van de waterafvoer via drainage en verdamping aan de rijping kan worden toegerekend. Bij de '25' velden bleek het organische-stofgehalte van de monsters genomen in september bijna 2 % hoger te zijn dan het organische-stofgehalte in februari. Dit maakt een vergelijking onmogelijk. De bijdrage van drainage en verdamping aan de rijping blijkt in het natte jaar 1998 klein te zijn.

Als extra metingen zijn 21 oktober 1998 ook monsters genomen en de rijpingsfactor bepaald van de specie die in het voorjaar als dunne specie tussen de wilgen was aangebracht. Voor het verpompen is zelfs water aan de specie toegevoegd. De specie is in een laag van ca. 0,25 m tussen de wilgen aangebracht na de eerste kap. De wilgen zijn gaan wortelen in de specie. De beworteling in de specie en de ondergrond zorgt voor een goede ontwatering. De laagdikte was in oktober nog ca. 10 cm. De monsters zijn in het pad over de volle dikte van de aangebrachte specielaag tussen de rijen wilgen genomen. Dus in het onbewortelde gedeelte. Het pad tussen de wilgen begroeid is echter wel begroeid geweest met onkruid. De resultaten van de rijpingsbepaling zijn gegeven in tabel 14

De specie blijkt nog net in de categorie 'Vrijwel ongerijpt' te vallen ($1,4 < n < 2,0$). De conclusie is dat in 1998 de specie tussen de wilgen voornamelijk is ontwaterd en slechts weinig gerijpt.

Tabel 14. Rijpingsbepaling aan monsters genomen op 21 oktober 1998 van de specie aangebracht tussen de wilgen.

Waarneming	A	H	L	n
	Gew. % vocht	% org. stof	% lutum	Rijpingsgetal Pons & Zonneveld
1	118.37	23.08	20.00	1.199
2	132.86	24.40	20.00	1.306
3	127.11	23.44	20.00	1.282
4	126.90	21.53	20.00	1.362
5	158.19	24.84	20.00	1.557
6	203.25	24.81	20.00	2.036
7	147.94	22.61	20.00	1.554
8	264.49	48.63	20.00	1.557
Gemiddelde	159.89	26.67	20.00	1.482

4.4.4 Modelling van het rijpingsproces

In dit onderzoek is ook nagegaan tot welk vochtgehalte baggerspecie moet uitdrogen om een zekere rijping te bewerkstelligen. Daartoe zijn de vochtretentiekarakteristieken bepaald aan het begin en aan het einde van het groeiseizoen. Deze karakteristiek geeft de samenhang tussen de onderdruk in het poriewater ('waterspanning'), uitgedrukt in de logaritme van de een waterkolom (cm), pF, en het vochtgehalte of vochtverhouding. Om de invloed van uitdroging op deze samenhang te simuleren is een monster op het laboratorium uitgedroogd tot pF3 en daarna weer verzadigd. Als referentie dient de vochtretentiekarakteristiek van een soortgelijke, volledig gerijpte grond (fig. 16)

Het rijpingsmechanisme wordt opgevat als een cyclisch proces van drogen en herbevochtigen. Als gevolg van waterverlies neemt de compactie toe waarvan een deel irreversibel is. Bij herbevochtiging wordt het oorspronkelijk verzadigd vochtgehalte dan ook niet meer bereikt. Het verloop van de rijping kan men zich als volgt voorstellen. Bij waterverlies neemt de vochtspanning toe volgens de actuele vocht karakteristiek. Wordt daarbij een vochtspanning bereikt die nog niet eerder in de bagger was voorgekomen, verandert de ruimtelijke bodemstructuur en neemt de pakkingdichtheid toe. Deze dichtheidstoename kan worden opgevat als een aanpassing van het bodemskelet aan verhoogde korrelspanningen. Ook de vorm van de vocht karakteristiek verandert (fig. 16).

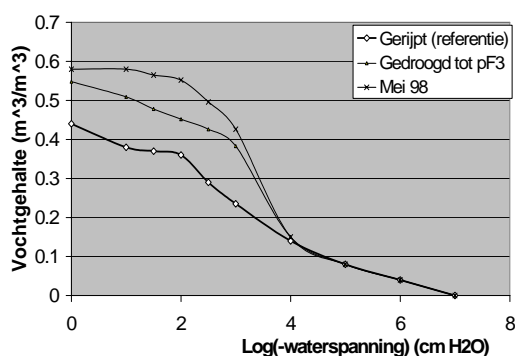


Fig. 16 Vochtretentiekarakteristiek van de uitgangssituatie (mei 98), na droging tot pF3 en een volledig gerijpte grond.

Aangenomen is dat deze verandering alleen optreedt in het traject tussen verzadiging en de tot dan bereikte vochtspanning. Bij herbevochtiging verandert de vochtspanning overeenkomstig de nieuwe karakteristiek. Aangenomen is dat de vorm van de nieuwe

karakteristiek in het bewuste vochtspanningstraject overeen komt met die van een volledig gerijpte grond Boels en oostindie, 1991). Uit figuur 16 valt dit af te leiden. De karakteristiek van bagger die tot pF3 is gedroogd loopt vrijwel evenwijdig aan de karakteristiek van de gerijpte grond in het traject pF 0-3. Volledige rijping zou volgens deze benadering zijn bereikt als de bagger uitdroogt tot een vochtspanning \sim pF3,5 – 4. Zulke waarden worden bij de bagger op de proefvelden bereikt als per kubieke meter droge baggerspecie 0,6 kubieke meter water irreversibel verdwijnt.

Op basis van het rijpingsmechanisme laat zich verklaren dat slib nooit volledig zal rijpen als daarin geen extreme vochtspanningen optreden. De maximale rijping wordt dus bepaald door de maximale vochtspanning (en de daaraan gerelateerde maximale vochtonttrekking) die ooit in de baggerspecie zal voorkomen.

4.4.5 Invloed van planten met een model bepaald

De wilg is in het voorjaar van 1998 ingeplant. De stekken hebben gedurende het groeiseizoen wortels ontwikkeld, maar de omvang en intensiteit ervan bleken aan het eind van het seizoen beperkt. De diepte bedraagt niet meer dan 0,3 m en de zijdelingse ontwikkeling is beperkt gebleven tot 0,15 m. Op de velden ontwikkelden zich ook zeer veel kruiden met een ondiep beworteling (\sim 0,2 m). De rijping op het veld zonder wilg is daardoor niet achter gebleven bij die op de velden met wilg. Verwacht wordt overigens dat er de komende jaren wel verschillen zullen optreden.

Om in dit stadium van onderzoek de invloed van planten op de rijping van baggerspecie te kwantificeren, is gebruik gemaakt van een (numerieke) simulatie van het rijpingsproces. De simulatie betreft de samenhang tussen vochtonttrekking en rijping volgens het beschreven mechanisme en vereist bij een gegeven bewortelingsdiepte en -intensiteit de berekening van de maximale vochtonttrekking die is voorgekomen in de onderscheiden bodemlagen gedurende een zekere periode. Deze onttrekking wordt beïnvloed door gewasverdamping, neerslag, drainage en eventuele kwel.

Voor de berekening van de vochtonttrekking is het reeds bestaand en uitvoering getest programma, SWAP (Van Dam et al.) gebruikt. Dit programma bevat een gewasmodule waarmee op basis van meteorologische

gegevens (neerslag, temperatuur, straling, bewolgingsgraad, windsnelheid) en gewas karakteristieken (hoogte, bladoppervlak) de gewasverdamping wordt berekend die optreedt als er geen watertekort is (potentiële verdamping). Met de bodemmodule wordt de netto vochtonttrekking op elke diepte berekend die mogelijk is gelet op de potentiële verdamping, bodemeigenschappen, bewortelingsdiepte en -intensiteit. De totale onttrekking is nooit groter dan de potentiële

verdamping en in werkelijkheid meestal geringer omdat de beschikbaarheid van water beperkt is of de toestroming van water naar de wortels in een droger wordende grond de maximale verdamping niet kan bijhouden. Deze module berekent ook de capillaire aanvoer van water uit bodemlagen onder de wortelzone, de drainafvoer en ondergrondse aanvoer in kwelgebieden.

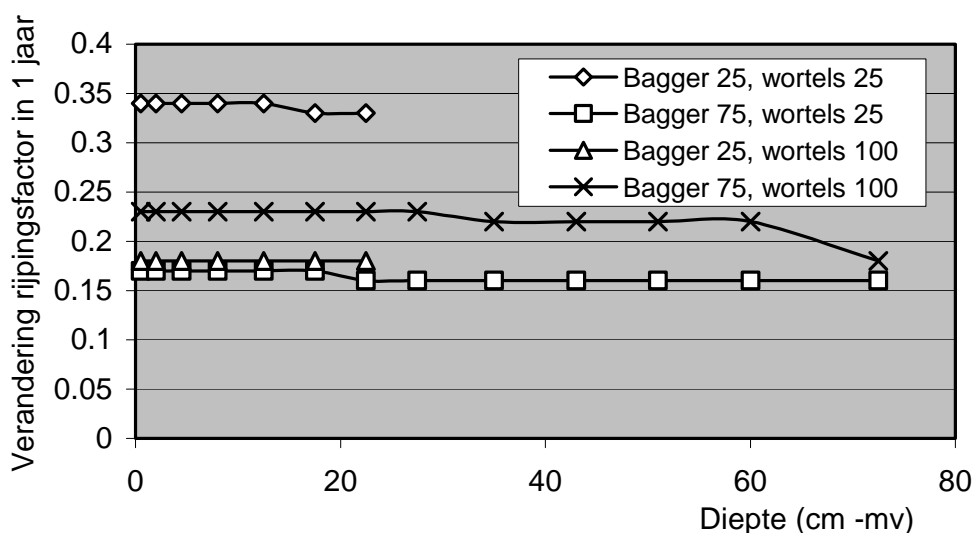


Fig. 17 Simulatie van verandering rijpingsfactor in 1 jaar

De benodigde invoergegevens zijn: (1) gewasontwikkeling (hoogte, bladoppervlak, bewortelingsdiepte en -intensiteit), (2) gewaskenmerken (gevoeligheid voor natte en droge omstandigheden), (3) bodemopbouw, (4) bodemkenmerken (vochtretentiekarakteristiek, onverzadigde doorlatendheidsrelaties), (5) hydrologische kenmerken zoals draindiepte en -intensiteit, kwel of wegzijging.

De eigenschappen van baggerspecie zijn op het laboratorium bepaald en die van de bestaande bodem ontleend aan het SC-DLO bodemkundig informatie systeem.

Het model genereert verschillende resultaten. Aan het einde van elke tijdstap zijn dat per bodemlaag: vochtspanning, vochtgehalte, vochtonttrekking door wortels en de hoeveelheid vocht die naar de aangrenzende bodemlagen stroomt of daar juist vandaan komt. Voor de berekening van het verloop van rijping in verschillende bodemlagen is een

applicatieprogramma geschreven die het verloop van het rijpingsgetal in elke onderscheiden bodemlaag berekent.

Een voorbeeld van zo'n simulatie is in figuur 17 gegeven. Het betreft een situatie die op de proefvelden is aangetroffen. De baggerspecie is in diktes van 0,25 en 0,75 m direct op de oorspronkelijke bodem aangebracht. De initiële rijpingsfactor is gelijkgesteld aan die in de proeven: 1,11. Het verloop van de rijpingsfactor is berekend voor een situatie waarin de bewortelingsdiepte 0,25 en 0,75 m bedraagt. De rijping is berekend voor een gemiddeld jaar. Aan het einde van dat jaar is voor elk bodemlaag de verandering van de rijpingsfactor weergegeven.

Uit de resultaten valt af te leiden dat bij een beperkte capillaire wateraanvoer vanuit de ondergrond en een beperkte bewortelingsdiepte, de rijping in dunne laag na een jaar aanzienlijke is. Dit spoor met de

ervaring dat baggerspecie die (in dunne lagen) op de kant wordt gezet in een jaar vrijwel volledig rijpt. Een beworteling van 0,25m in 0,75 m baggerspecie veroorzaakt rijping in de gehele laag bagger. De oorzaak is dat dank zij een relatief goede onverzadigde doorlatendheid ook vocht aan de lagen onder de wortelzone wordt onttrokken. Deze onttrekking is echter beperkt en daardoor blijft de rijping ook beperkt.

Bij een bewortelingsdiepte van 1,0 m in een laag baggerspecie van 0,75 m, blijkt de vochtonttrekking groter dan bij een ondiepe beworteling. De rijping is dan ook navenant groter. Een zelfde bewortelingsdiepte, maar dan in combinatie met 0,25 m baggerspecie, laat zien dat de vochtonttrekking in de ondiepe lagen vergeleken bij ondiepe beworteling, geringer is. De rijping is groter dan bij een beworteling van 0,25 en 0,75 m bagger, maar geringer dan bij een ondiepe beworteling en een beperkte laag baggerspecie.-

Uit de simulaties blijkt dat, gezien vanuit het perspectief van rijping, de dikte van de baggerspecie beperkt moet blijven in situaties met een beperkte bewortelingsdiepte, terwijl dunne lagen juist niet effectief zijn bij grotere bewortelingsdieptes.

Het voorspellen van de maximale rijping op verschillende dieptes vergt dus inzicht in (1) de bewortelingsdiepte en de verdeling van de maximale vochtonttrekking over de diepte en (2) de vochtretentiekarakteristiek van zowel gerijpte als ongerijpte baggerspecie.

4.4.6 Ontwikkeling afbraakcondities

Voor de afbraak van PAKs en olie zijn behalve aërobe omstandigheden ook voldoende nutriënten en een toereikende zuurgraad nodig. Aërobe omstandigheden ontstaan als er voldoende lucht in het porie- of scheursteelsels aanwezig is voor aanvoer van zuurstof via moleculaire diffusie. Zuurstof wordt voornamelijk verbruikt voor de afbraak van organische stof.

De hoeveelheid lucht in baggerspecie wordt hoofdzakelijk bepaald door scheuren die tijdens het uitdrogen ontstaan. De baggerspecie zelf blijft echter met water verzadigd. Pas wanneer veel water wordt onttrokken dringt ook lucht in de aggregaten. Dit proces is af te leiden uit het zwel- en krimpgedrag van baggerspecie. Deze is in figuur 18 weergegeven als de samenhang tussen de vochtverhouding (volume vocht/volume vaste delen) en porieverhouding (volume

poriën/volume vaste delen). Door waterverlies neemt het scheurvolumen toe. Bij een isotrope krimp neemt bijvoorbeeld het scheurvolumen toe tot $0,13 \text{ m}^3$ per m^3 baggerspecie als een aanvankelijke vochtverhouding daalt van 3 naar 2. Daalt de vochtverhouding tot 1, dan neemt het scheurvolumen toe tot $0,29 \text{ m}^3$ per m^3 bagger.

Er treedt pas lucht in de aggregaten als de afname van de porieverhouding geringer is dan de afname van de vochtverhouding

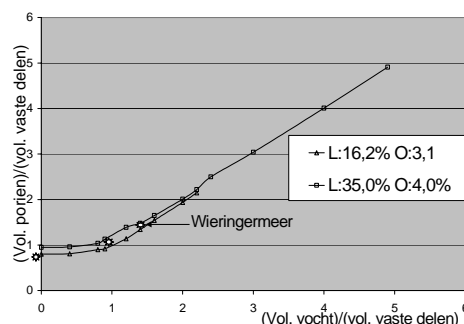


Fig. 18 Krimp-karakteristiek van gerijpte grond (16,1, % lutum, 3,1% org. stof) en een volledig ongerijpte slib (35% lutum en 4 % org. stof)

In figuur 18 is dat het geval als de functie afwijkt van de 45°-lijn. Voorts blijkt uit deze figuur dat de maximale vochtverhouding van een gerijpte grond aanmerkelijk geringer is dan van een ongerijpte grond (Kim et al., 1992a).

Uit het krimpgedrag van baggerspecie blijkt dat bodemaggregaten tot een zekere uitdrogingsgraad met water verzadigd blijven. Aërobe omstandigheden zullen daarom alleen worden aangetroffen in een dunne laag aan het oppervlak van de bodemaggregaten. Daaronder zijn de omstandigheden anaëroob. Het volume waarin afbraak voor kan komen is dan ook beperkt. Er komen dus naast elkaar oxidatie- en reductieprocessen voor. Deze toestand wordt gekarakteriseerd door de redox-potentiaal van de bodem en is op de verschillende velden op verschillende dieptes gemeten (fig. 11). Waarschijnlijk als gevolg van de beperkte bewortelingsdiepte van de wilg en de explosieve ontwikkeling van kruiden, kon geen invloed van de wilg op de afbraakcondities worden vastgesteld

4.4.7 Conclusies

- De rijpingsfactor is een zeer bruikbare indicator voor het karakteriseren van de rijpingstoestand;
- Krimpkenmerken laten zien dat ondanks de aanwezigheid van scheuren in baggerspecie, de aggregaten nog met water verzadigd zijn ;
- Redoxpotential metingen bevestigen de gelijktijdige aanwezigheid van aërobe en anaërobe condities in de bodem;
- Het zuurstofgehalte in de baggerspecie is op zich geen getrouwe weergave van de afbraakcondities in baggerspecie;
- Ondanks het extreem nat jaar is de rijpingsgraad van de baggerspecie verbeterd;
- Vermoedelijk speelt afbraak van PAKs en minerale olie zich af in een dunne schil rond de aggregaten. Vergroting van dit oppervlak door bodemstructuurvorming zou dan ook tot grotere afbraaksnelheden moeten leiden;
- Op basis van de vochtkenmerken van een natte specie en van een zelfde volledig gerijpte grond, gekoppeld aan de onverzadigde doorlatendheidsrelaties, is het verloop van rijping goed te voorspellen;
- Simulaties van het rijpingsproces laten zien dat dunne lagen baggerspecie in combinatie met diep wortelende planten niet effectief zijn;
- Ook laten simulaties zien dat de combinatie van ondiep wortelende gewassen en relatief dunne lagen baggerspecie zeer effectief zijn. Dit geldt ook voor een combinatie van dikke lagen baggerspecie en diepe beworteling.
- Het aanbrengen van natte specie in een bestaand wilgenbestand heeft geen nadelige invloed op de hergroei van de wilg, er is een forse ontwatering bereikt;
- De ontwikkeling van jonge wilgenstekken kan in de aanvangfase worden geremd door uitbundige kruidenontwikkeling.

4.5 Effect van baggerspecie op de groei van wilg

De interactie tussen de wilg en baggerspecie kent twee richtingen. De eerste is reeds besproken: de invloed van de wilg op ontwatering en rijping. De andere richting is de invloed van baggerspecie op de groei en ontwikkeling van de wilg, want hoe hoger de financiële opbrengst van de wilg, des te lager zijn de reinigingskosten van baggerspecie. Onderzocht is de ontwikkeling van pas ingeplante wilg in een deels gerijpte baggerspecie en de hergroei van een al ontwikkeld wilgen bestand na aanbrengen van natte baggerspecie

4.5.1 Wilg aangeplant op ontwaterde baggerspecie

In december 1998 was de relatie tussen de droge stengelmasse (D_s in gram) en de stengeldiameter (D in mm) op 10 cm boven maaiveld op het met ontwaterde specie aangelegde proefveld:

$$D_s = 37,8 \cdot 10^{-3} \times D^{2,64}$$

Met behulp van deze relatie werden uit waarnemingen van de stengeldiameter en stengeltellingen de drogestofopbrengsten per stengel en per hectare berekend (tabel 15). De behaalde opbrengsten waren zeer laag op alle veldjes, dus ook op de veldjes zonder baggerspecie. Een drogestofaanwas van ca. 2,5 ton per hectare in het jaar van aanplant is normaal. De extreem lage drogestofaanwas werd veroorzaakt door de combinatie van laat inplanten, een droogteperiode direct na het planten gevolgd door zeer natte omstandigheden, een forse onkruiddruk, aantasting door het wilgenhaantje en de daaropvolgende schimmelinfectie. Verschillen in opbrengst tussen velden met en zonder baggerspecie en tussen velden met een

verschillende laagdiktes konden niet worden geconstateerd.

4.5.2 Gevestigde wilg na toedienen van natte baggerspecie

Tijdens de aanleg van de veldproef aanbrengstrategie werd direct al duidelijk dat het plantverband grotendeels verloren gaat bij toediening van 100 cm specie omdat op die hoogte de wilgenstengels al sterk zijdelings uitgroeien. Dit was ook het geval bij de laagdikte van 50 cm, zij het in mindere mate

In mei bleek dat alle afgesneden stengels weer uitliepen. Het aantal scheuten dat zich per stengel ontwikkelde nam sterk toe met de dikte van de specielaag (tabel 15 en 16). Een aantal van de nieuwe scheuten ontwikkelde zich niet verder, zoals te zien is aan de afname van het aantal scheuten per afgesneden stengel tussen mei en december. Het verschijnsel dat er zich per stengel meer scheuten ontwikkelden naarmate de baggerspecielaag dikker was, bleef echter bestaan.

Tabel 15 Geschatte drogestofopbrengst per hectare (ton) en per stengel (g) van wilg bij verschillende laagdikte (cm) van aangebrachte ontwaterde baggerspecie.

Laagdikte	Aantal stengels per ha	Drogestofopbrengst	
		g / stengel	Ton / ha
0	14788	10	0,15
25	17486	8	0,14
50	17186	10	0,18
75	16587	11	0,18

Tabel 16 Gemiddeld aantal nieuwe scheuten per afgesneden stengel in mei en december voor laagdikten van 100, 50, 25 en 0 cm baggerspecie (n = aantal afgesneden stengels waaraan geteld werd).

Laagdikte (cm)	Gem. aantal scheuten per stengel		n
	mei	December	
100	4,4	3,2	166
50	4,0	2,9	152
25	3,2	2,1	196
Geen	1,6	1,4	159

Tabel 17 Gemiddelde scheutdiameter (in mm), berekende scheutmassa (in gram ds) en de bijgroei per hectare (ton ds/ha) voor laagdikten van 100, 50 en 25 cm baggerspecie en de referentiebehandeling “geen baggerspecie”.

Laagdikte (cm)	Gem. Scheutdiameter (mm)	Gem. Scheutmassa (gram ds)	Aantal Scheuten per hectare	Bijgroei (ton ds/ha)
100	6,8	14,0	108.000	18,3
50	7,6	17,7	86.000	18,3
25	7,2	14,8	88.000	15,6
Geen	7,3	13,7	42.000	6,9

De gevonden relatie tussen de droge scheutmassa (D_s in gram) en de scheutdiameter (D in mm) op 10 cm boven de aanhechting van de scheut op de afgesneden stengel is:

$$D_s = 44,8 \cdot 10^{-3} \times D^{2,69}$$

Met deze relatie werd de drogestofaanwas per hectare berekend (tabel 17).

De bijgroei op het veldje zonder baggerspecie kan vergeleken met andere waarnemingen op de wilgenplantage als normaal voor het eerste jaar na de oogst van 4 jarige wilg beschouwd worden.

De bijgroei op de veldjes met natte baggerspecie was aanzienlijk hoger dan op het referentieveldje. Omdat de verschillen tussen de gemiddelde scheutmassa niet groot zijn lijkt de hoge bijgroei op de baggerspecieveldjes voornamelijk het gevolg te zijn van het grotere aantal scheuten dat per afgesneden stengel gevormd wordt.

Tijdens de eerste maanden van de groei werd opgemerkt dat de afgesneden wilgenstengels in de natte baggerspecie makkelijk wortels vormden. Door het krimpen van de specie kwamen de wortels die boven in de natte specie gevormd waren in de lucht te hangen en ontwikkelden zich niet verder. Dit verschijnsel deed zich vooral voor bij de aanvankelijk 100 cm dikke specielaag, die al na een aantal

maanden inklonk tot een laagdikte van 60 cm. Eventuele negatieve gevolgen voor de wilgen werden niet opgemerkt.

In de maand juli werd de aanplant aangetast door het wilgenhaantje (*Phyllodecta vulgatissimo* (L)), waardoor al het blad verloren ging en de wilg eind augustus kaal was. Op de verzwakte wilg ontwikkelde zich ook een schimmel (Zwarte kanker; *Glomerella singulata* (Ston.)). De behaalde bijgroei is daarom waarschijnlijk lager dan mogelijk geweest was als de plaag bestreden had kunnen worden. Er is geen enkele aanwijzing dat de plaag en de schimmelaantasting direct of indirect veroorzaakt zijn door de baggerspecie.

Verlies van plantverband moet vermeden worden om mechanische oogst mogelijk te maken. Bij een dikke laag baggerspecie moet daarom het plantverband in de hoogte intact blijven. Dit is mogelijk te realiseren door aanbrengen van baggerspecie in éénjarige wilg (lange stekken), door opsnoeien in het eerste jaar van de aanplant of door wegnemen van uit de rij staande stengels vooraf aan het aanbrengen van de specie. Gezien de aanwijzingen dat de goede bijgroei bij natte baggerspecie vooral veroorzaakt wordt door het grotere aantal uitlopers per stengel wordt verwacht dat ook bij behoud van het plantverband het aanbrengen van baggerspecie

een positief effect zal hebben op de bijgroei in het eerste jaar.

4.5.3 Conclusies

- Er zijn geen aanwijzingen dat de groei van wilg op ontwaterde baggerspecie achterblijft bij die van wilg op de oorspronkelijke bodem.
- Door het aanbrengen van met minerale olie verontreinigde, natte baggerspecie in een bestaande, geoogste wilgeaanplant wordt de bijgroei van wilg sterk bevorderd.
- De dikte van de aangebrachte laag had geen aantoonbare invloed op de groei van wilg, zowel op natte als op reeds ontwaterde specie.
- Zonder aanvullende maatregelen leidt het aanbrengen van een dikke laag baggerspecie (50 – 100 cm) tussen 4 jarige wilgen tot verlies van het plantverband.

4.5.4 Aanbevelingen

- Om de toedieningskosten van natte specie laag te houden en de bijgroei van wilg te stimuleren wordt aanbevolen om als aanbrengstrategie voor een éénmalige toediening van een dikke laag natte baggerspecie (1 m) te kiezen.
- Om de mogelijkheid van mechanisch oogsten van hele stengels te behouden wordt aanbevolen om het plantverband ook bij een dikke laag natte baggerspecie intact te houden door toediening in éénjarige wilg (lange stekken) of door snoei.

5 Handreikingen, perspectieven, kosten

Een nog niet opgeloste vraag betrof de optimale dikte van de aan te brengen laag baggerspecie en in verband met de kosten van de sanering volgens het DLO-concept. De kosten worden zeer bepaald door de laagdikte en de saneringsduur. Voorwaarde voor de reiniging van baggerspecie is dat deze volledig rijpt en dat de omstandigheden zoveel mogelijk aëroob zijn. De dikte van de laag baggerspecie en de ontwateringstoestand dient daarop te worden afgestemd. Een aantal handreikingen is hier aangegeven

5.1 Laagdikte

5.1.1 Realiseren volledige rijping

De laagdikte moet zodanig gekozen worden dat volledige rijping van de baggerspecie mogelijk is. De periode waarin rijping moet optreden wordt bepaald door de levenscyclus van het gewas dat er op wordt geteeld. Voor wilgen geldt dat deze een keer per drie tot vier jaar geoogst worden en omdat dit volledig mechanisch gebeurt, moet de draagkracht op dat moment voldoende zijn. Dat wil zeggen dat de bagger dan gerijpt moet zijn.

Volledige rijping wordt bereikt als tot onder in de laag voldoende vocht wordt onttrokken. Gebleken is dat daarvoor een vochtspanning bereikt moet worden die ligt tussen pF_{3,5} en pF₄. Om dit te beoordelen wordt de verdeling van de maximale vochtonttrekking over de diepte bepaald. Van belang daarbij is het maximaal verschil tussen verdamping en neerslag, de bewortelingsdiepte en het onttrekkingspatroon. Een complicatie daarbij is dat vocht ook capillair wordt aangevoerd vanuit bodemlagen onder de wortelzone waardoor de bodem plaatselijk minder uitdroogt dan op grond van de vochtonttrekking verwacht wordt. Voorlopig wordt er van uitgegaan dat de bodem maximaal kan uitdrogen in 0,8 deel van de wortelzone en gemiddeld tot de helft van het maximum in een laag van 0,3 m (zware klei en zand) of 0,5 (zavel, löss en leem) daar onder. In die laag neemt de ontrekking af van maximaal vlak onder de wortelzone tot 0 aan de onderzijde van die laag. De grootte van de maximale onttrekking wordt bepaald door de bewortelingsdiepte en het maximum verschil tussen neerslag en verdamping in het groeiseizoen. In tabel 13 is de maximale vochtonttrekking van verschillende gewassen gegeven. Dit maximum is voor verschillende droogte frequenties weergegeven. Een droogtefrequentie van 10% wil zeggen dat het in 10 jaar per 100 jaar droger is geweest.

Uit tabel 18 blijkt dat vooral (volwassen) bomen in principe veel water kunnen verdampen. Jonge, pas ingeplante wilgen kunnen overigens wegens hun beperkte bewortelingsdiepte en -intensiteit nog niet zoveel verdampen als volgroeide bodem.

Tabel 18 Maximaal verschil tussen potentiële verdamping en neerslag (mm)

Gewas	Worteldiepte (cm)	Droogte frequentie		
		10	20	50%
Gras	25	140	125	100
Akker bouw	50 – 80	165	155	130
Bomen	50 – 150	290	280	250

Uitgaande van het patroon van de maximale vochtonttrekking, is berekend hoeveel vocht jaarlijks maximaal per laag van 10 cm kan worden onttrokken in de verschillende droogtejaren. Deze hoeveelheden zijn in fig. 19 weergegeven. De laagdikte waarin deze hoeveelheid kan worden onttrokken varieert voor gras van 0,35 tot 0,45 m, voor akkerbouwgewassen van 0,55 tot 0,9 m en voor volgroeide bodem van 0,55 tot 1,05 m.

Om te beoordelen of volledige rijping kan worden bereikt, dient men uit te gaan van een vochtspanning die minstens één keer bereikt moet worden (bij de baggerspecie uit het experiment een pF > 3,5). Uit de vochtretentiekarakteristiek van een overeenkomstige, volledig gerijpte grond wordt afgeleid hoeveel vocht onttrokken moet worden om de vochtspanning van een waarde tussen pF_{1,5} en 2 ('veldcapaciteit') te brengen naar de minstens te bereiken waarde (hier ~ pF_{3,5}). Voor de baggerspecie in het experiment is dat ca. 30 mm per laag van 10 cm (zie fig. 16).

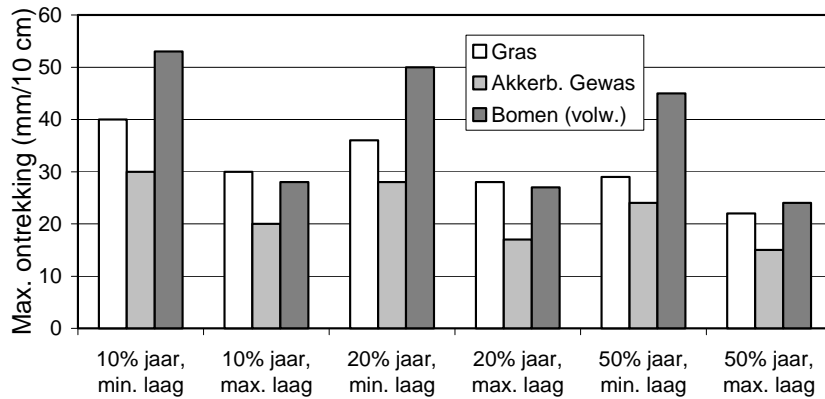
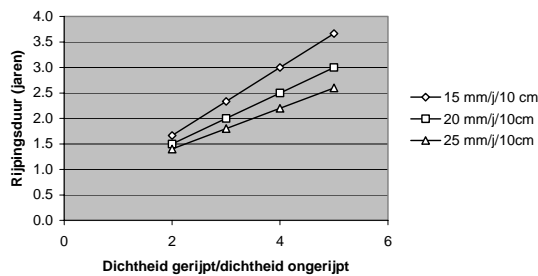


Fig. 19 Maximale vochtonttrekking door verschillende soorten begroeiing in verschillende jaren

Als er van wordt uitgegaan dat volledige rijping in 50% droogte jaren gerealiseerd moet kunnen worden, dan zou de laagdikte van de gerijpte baggerspecie hooguit 0,4 m mogen bedragen als gras wordt ingezaaid. Bij toepassing van akkerbouwgewassen kan de baggerspecie in een laag van ca. 0,6 m worden aangebracht. Plant men echter bomen in de baggerspecie, dan zou de laagdikte ca. 0,8 m kunnen bedragen.

Indien echter wordt geëist dat de baggerspecie na een zekere tijd berijdbaar moet zijn zoals in het geval van wilgen, dan wordt de laag op te brengen baggerspecie bepaald door de duur waarin rijping plaats vindt.



Figuur 20. Rijpingsduur in relatie tot maximale vochtonttrekking door gewas per laag van 10 cm

We nemen aan dat de planten na het aanbrengen van de bagger beginnen met het ontwikkelen van wortels, maar dat deze te lijden hebben van de inkrimpende baggerspecie en daardoor een deel van hun effectiviteit verliezen. Daarnaast nemen we aan dat verdamping de enige oorzaak is van waterverlies en dat een zekere maximale wateronttrekking kan worden gerealiseerd.

Deze maximale wateronttrekking in een natte baggerspecielaag is gelijk aan de maximale onttrekking als deze laag volledig zou zijn gerijpt.

De rijpingsduur is dan eenvoudig te berekenen. In figuur 20 is deze weergegeven, uitgaande van verschillende verhoudingen tussen de dichtheid van de vers aangebrachte bagger en de dichtheid van de bagger in volledig gerijpte toestand. Als bijvoorbeeld na 2 jaar de rijping voltooid moet zijn, mag de verhouding tussen de gerijpte en ongerijpte dichtheid 3 zijn bij een maximale vochtonttrekking van 20 mm per jaar uit een laag van 10 cm gerijpte grond. Bij een effectieve bewortelingsdiepte van 0,3 m zou men in dat geval een laag (natte) baggerspecie van $3 \times 0,3 \text{ m} = 0,9 \text{ m}$ in een keer kunnen aanbrengen.

5.1.2 Handhaven aërobe condities

Baggerspecie bevat organische stof die onder aërobe omstandigheden langzaam wordt afgebroken. Het zuurstofverbruik daarbij wordt aangeduid met bodem-ademhaling. De zuurstofconcentratie in bodemlucht zou dalen als er geen nieuwe zuurstof zou worden aangevoerd. Daling van de concentratie brengt echter een diffusiestroom op gang, die het tekort aanvult. Als drijvende kracht fungeert de zuurstofconcentratiegradiënt van maaiveld naar diepere lagen. De grootte van de aanvoer wordt bepaald door deze gradiënt en de zuurstof-diffusiecoëfficiënt. De grootte van deze coëfficiënt hangt samen met de fractie luchtgevulde poriën en verder met de poriegeometrie. Hoe groter deze fractie des te groter de diffusiecoëfficiënt is.

In een bepaalde bodemlaag heerst een aërobe toestand als de zuurstofaanvoer gelijkke tred

houdt met het zuurstofverbruik in die laag en in de bodem eronder. Anaërobe omstandigheden ontstaan wanneer de zuurstofaanvoer achterblijft bij het verbruik.

Er is dus een zeker luchtgehalte nodig voor een voldoende zuurstofaanvoer. De laag baggerspecie kan echter niet onbeperkt dik zijn.

Om de laagdikte te bepalen die ten aanzien van de zuurstof toevoer limiterend is, wordt uitgegaan van de eis dat in perioden met een neerslagoverschot, de omstandigheden tot onder in de laag baggerspecie aërobe moeten zijn. Dat betekent dat in die periode het neerslagoverschot in de onverzadigde zone wordt getransporteerd en het luchtgehalte voldoende groot is om de vereiste zuurstofvoorziening te garanderen. In de onderzijde van de laag mag dus geen verzadigde toestand worden aangetroffen en dat stelt weer eisen aan de ligging van de baggerspecie boven het grondwaterniveau. De laagdikte wordt voor een zekere bodemademhaling bepaald uit de samenhang tussen de vochtspanning in de onderzijde van de laag baggerspecie en de daarbij behorende maximale laagdikte. Daarbij mag het zuurstofgehalte onderin de laag niet lager zijn dan 1%. Deze berekening vergt inzicht in de samenhang tussen de vochtspanning en luchtgehalte (te ontleen aan fig. 16), het zuurstofverbruik van baggerspecie en het verloop van het luchtgehalte in de laag bij de afvoer van neerslagoverschot. Aangenomen is dat de vochtspanning onder in de laag maatgevend is en het daarbij behorend luchtgehalte in de gehele laag wordt aangetroffen, hetgeen een conservatieve benadering is. Getoetst is of onder die voorwaarden het neerslagoverschot kan worden afgevoerd. Als criterium geldt dat de onverzadigde doorlatendheid die hoort bij die bepaalde vochtspanning gelijk of groter is dan het gemiddeld dagelijks neerslagoverschot ($m \cdot d^{-1}$). De samenhang tussen de vochtspanning en de onverzadigde doorlatendheid een volledig gerijpte baggerspecie is gebruikt.

De berekende samenhang tussen de vochtspanning onderin de laag baggerspecie en de laagdikte is in figuur 20 weergegeven. Omdat de diffusiecoëfficiënt een spreiding toont, is een minimum en maximum laagdikte weergegeven. Uit figuur 21 blijkt dat wanneer de vochtspanning gering is, wat overeenkomt met een gering luchtgehalte, de laagdikte voor een goede zuurstofvoorziening beperkt moet blijven. Naarmate de vochtspanning groter is

en dus het luchtgehalte ook navenant groter, kan een dikkere laag worden toegepast. De laagdikte waarin baggerspecie in dit experiment, kan worden toegepast ligt tussen 0,4 en 0,9 m als de vochtspanning onderin de laag op minstens 30 cm H₂O kan worden gehandhaafd.

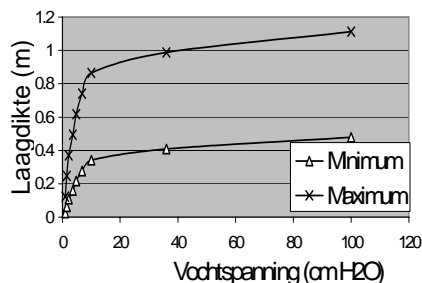


Fig. 21 Laagdikte baggerspecie in relatie tot vochtspanning onder in deze laag waarbij een goede zuurstofvoorziening is gewaarborgd (bij een maximum en minimum diffusiecoëfficiënt)

5.2 Ontwateringstoestand

5.2.1 Vochtspanning onderzijde specielaag
De vochtspanning onderin de baggerspecie wordt bepaald door de ontwateringsituatie. In het algemeen geldt dat naarmate het grondwaterniveau dieper onder de baggerspecielaag ligt, de vochtspanning onderin de baggerspecie ook groter is. De samenhang tussen die vochtspanning en de afstand tussen het grondwaterniveau en onderzijde baggerspecie is afgeleid uit de samenhang tussen de onverzadigde doorlatendheid van de ondergrond en het neerslagoverschot dat moet worden afgevoerd.

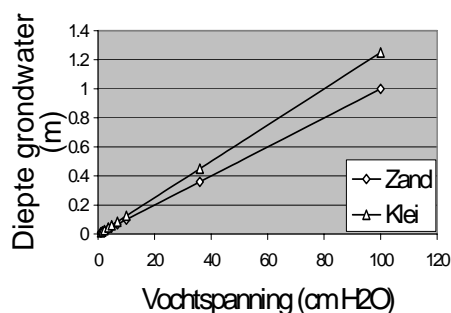


Fig 22 Afstand tussen grondwaterniveau en onderzijde baggerspecielaag in relatie tot de vochtspanning juist onder deze laag

Voor twee typen ondergrond is deze relatie in fig. 22 weergegeven. Voor zavelgronden komt de relatie overeen met die van zandgronden.

Uit deze figuur blijkt dat de afstand tussen het grondwatervniveau en de onderzijde van de baggerspecielaag minstens 0,3 – 0,4 m moet zijn om onderin de baggerspecielaag een vochtspanning van 30 cm H₂O te realiseren.

5.2.2 Ontwateringdiepte

De ontwateringdiepte van de landfarm moet zodanig zijn dat bij afvoer van het gemiddeld neerslagoverschot de vereiste vochtspanning onderin de baggerspecie wordt bereikt. Dat eist een zekere afstand tussen de baggerspecie en de grondwaterspiegel (af te leiden uit fig. 22). Om het neerslagoverschot af te voeren naar de drains of sloten, moet een zekere niveauverschil bestaan tussen de grondwaterspiegel en het watervniveau in de sloot of drain. Dit verschil wordt bepaald door de ontwateringintensiteit. De ontwatering van landbouwgronden wordt ontworpen voor een afvoer van 0,007 m.d⁻¹, waarbij het grondwater maximaal 0,5 m onder maaiveld staat. Bij een slootpeil van 1 m onder maaiveld is de opbolling van het grondwater midden tussen evenwijdige sloten 0,5 m. De opbolling bij een drainafvoer van 0,002 m.d⁻¹ zou dan $2/7 \times 0,5 = 0,14$ m bedragen. In de praktijk werkt het ontwateringsstelsel niet volgens het oorspronkelijk ontwerp, een score van 75% is gangbaar. In dat geval is de opbolling van het grondwatervniveau bij een afvoer van 0,002 m.d⁻¹ ca. 0,2 m.

Uitgaande van een afvoersysteem zoals juist is beschreven, en een vereiste vochtspanning van -30 cm H₂O, is een opbolling van het grondwater ten opzichte van het slootpeil vereist van 0,2 m, en een afstand tussen de baggerspecie en het grondwater van 0,4 m (klei, zie fig. 22). Het vereiste slootpeil is dan (0,2 + 0,4 + laagdikte baggerspecie) m onder maaiveld (bovenzijde baggerspecie).

5.3 Saneringsduur

De duur van de sanering wordt bepaald door de aanvankelijke en te bereiken verlaging van de gehalten aan PAKs en minerale olie en de afbraaksnelheid. Voor PAKs is de afbraaksnelheid gerelateerd aan de PAK samenstelling (zie tabel 2). PAKs met een gering aantal benzeenringen breken gemakkelijker af dan met veel ringen. Een ideale situatie zou zijn als van een partij baggerspecie vooraf kan worden vastgesteld hoeveel PAKs en olie afbreekbaar zijn en hoe lang het duurt om een zekere gewenste eindsituatie te bereiken. De in dit onderzoek gebruikte batch testen geven inzicht in de fracties die in een seizoen beschikbaar komen

voor afbraak, maar is voor extrapolaties onvoldoende nauwkeurig. De centrale vraag is of de beschikbare fractie via een diffusie en evenwichtsproces beschikbaar komt en dan jaarlijks in ongeveer gelijke hoeveelheden kan worden afgebroken, of dat de afbraaksnelheid evenredig is met de aanwezige voorraad en dus een exponentieel verloop kent. Ook denkbaar is dat de PAKs zodanig aan de organische stof is gekoppeld, dat deze alleen via afbraak van organische stof vrij komt. Experimenten die tot dusverre zijn uitgevoerd (waaronder op de Kreekraaksluizen) hebben onvoldoende lang geduurd om daarover inzicht te krijgen. Afhankelijk van de kinetiek van de organische verontreiniging ligt de saneringsduur van de baggerspecie in dit experiment tussen 10 en 20 jaar.

De te bereiken eindgehalten zijn discutabel. De bioassay met regenwormen geven geen eenduidig beeld van risico's. Zeker is dat er geen acute risico's bestaan. De gesuggereerde sub-letale effecten zijn niet met zekerheid te geven omdat de invloed van de partieel gerijpte baggerspecie niet apart kon worden vastgesteld en niet uitgesloten mag worden dat de invloed van de bodemstructuur, die gaande weg verbetert, een dominante rol speelt bij de groei en ontwikkeling van regenwormen. Dit aspect verdient nadere aandacht en is aanvullend op aanbevelingen die Van de Guchte et al., 1996 hebben geformuleerd.

Als risicobenadering een centrale rol zou gaan spelen bij de verwerking en hergebruik van baggerspecie, dan zou de consequenties zijn dat voor de baggerspecie in dit experiment de rijpingsduur van de bagger maatgevend is voor de 'saneringsduur'.

5.4 Potentieel van het reinigingsconcept

Om te beoordelen of het DLO-reinigingsconcept een bijdrage kan leveren aan de oplossing van de baggerproblematiek werden in de definitiestudie (Harmsen et. al., 1997) kengetallen ingeschat voor 3 baggerspecie-aanvangskwaliteiten (licht, matig en zwaar verontreinigd), 3 eindkwaliteiten (schone grond, kantgrond en bouwstof). Ter vergelijking werden deze kengetallen ook bepaald voor de verwerkingsroutes op de kant zetten en extensieve reiniging in depot. Als indicatie kwam hieruit voort dat met het DLO-concept potentieel ongeveer 32 % van het totale aanbod van baggerspecie concurrerend verwerkt zou kunnen worden tot schone grond (38 %), kantgrond (41 %) en bouwstof (21 %).

Hierbij werd uitgegaan van de actief-bodembeheer gedachte en werd aangenomen dat de risico's voor de mens, het ecosysteem en de omgeving aanvaardbaar klein zouden zijn, zowel tijdens het reinigen als bij de uiteindelijke toepassing van de gereinigde grond. Zonder toepassing van de actief-bodembeheer gedachte leek het DLO-concept weinig perspectief te bieden omdat dan alleen klasse 2 speciel in aanmerking komen, waarvoor verwerking op de kant aantrekkelijker is.

In het huidige onderzoek is getracht om meer duidelijkheid te verschaffen over een aantal mogelijke risico's, om de technologie verder te optimaliseren en om kwalitatief betere kengetalschattingen voor het DLO-concept te verkrijgen.

Niet onderzocht werd bij welke eindkwaliteit (alle restfracties, in het bijzonder PAK en/of olie) de grond onder een actief-bodembeheerbeleid als "multifunctioneel met aanvaardbaar kleine risico's" zou mogen worden beschouwd. In de definitiestudie werd hiervoor het begrip kantgrond (arbitraire grens 6 mg/kg PAK) geïntroduceerd. In de huidige aanbodstudie wordt gesuggereerd om hiertoe een klasse 1 PAK te definiëren met een overigens eveneens arbitraire bovengrens van 2,5 mg/kg PAK.

In voorgaande hoofdstukken werd reeds ingegaan op de resultaten van de aanbodstudie, het veldonderzoek en simulatiestudies. In deze paragraaf is de nieuwe informatie verwerkt voor de situatie in het gebied van Hoogheemraadschap Uitwaterende Sluizen (HUS). Eerst is ingeschat wat de meest relevante extensief-biologische verwerkingsroutes zijn, waarna voor deze routes de kosten en baten werden berekend. Ook de resultaten van onderzoek in het kader van het PBTS programma (SENER) naar technologie voor toediening van speciel op het

veld (Vermeulen et al., 1999) zijn meegenomen in de uitgangspunten voor deze kostenberekeningen.

5.4.1 Potentiële hoeveelheden en belangrijke verwerkingsroutes

Uit de aanbodstudie is af te leiden (tabel 19) welke hoeveelheden van verschillende kwaliteiten baggerspeciel in het gebied aanwezig zijn, onderverdeeld naar de bereikbare eindkwaliteit op korte (1 - 3 jaar) en lange termijn (10 - 40 jaar).

Voor klasse 2 speciel is op de kant zetten duidelijk de goedkoopste oplossing. In een toenemend aantal gevallen, zoals in stedelijk gebied, kan de speciel echter niet op de kant gezet worden. In dat geval lijkt extensieve biologische reiniging uitkomst te bieden. Bij continuering van de regeling dat klasse 2 speciel op de kant gezet mag worden kan overwogen worden om, als consequentie, dan ook extensieve biologische reiniging van dit materiaal toe te staan zonder eisen ten aanzien van onderafdichting, monitoring en gebruik van de grond na rijping (achtergrondwaarde route). Wellicht zou wel een eenvoudige milieuvergunning noodzakelijk zijn om te voorkomen dat de speciel terecht komt in gebieden die schoner zijn dan de bereikbare eindkwaliteit van de speciel.

Het DLO-concept met wilgenteelt was oorspronkelijk bedoeld voor de lange termijn reiniging van PAK en olie-verontreinigde speciel van klasse 3/4 naar de streefwaarde (schone-grond route). Hierop was ook de tijd dat een wilgenaanplant de grond bezet houdt (20 jaar) afgestemd. Uit de aanbodstudie werd duidelijk dat hiervoor geschikte speciel binnen het gebied van HUS tot de hoge uitzondering behoren, enerzijds doordat de aanwezigheid van lichte verontreinigingen met zware metalen en dergelijke verbetering verhinderen en anderzijds ook omdat er speciel zijn met zeer moeilijk afbreekbare PAK-verbindingen.

Tabel 19 *Schatting van hoeveelheden verontreinigde baggerspeciel (in 10⁶ m³) in het gebied van HUS, onderverdeeld naar de bereikbare kwaliteit op korte (1-3 jaar) en lange (10-40 jaar) termijn.*

Bereikbare kwaliteitklasse	Initiële verontreinigingsklasse					
	Klasse 2 **) Totaal 12,9		Klasse 3 Totaal 6,3		Klasse 4 Totaal 2,8	
	Korte termijn	Lange termijn	Korte termijn	Lange termijn	Korte termijn	Lange termijn
Klasse 0, 1 *)	5,6 (43%)	5,6 (43%)	-	1,8 (28%)	-	0,1 (2%)
Klasse 2 **)	7,3 (57%)	7,3 (57%)	3,7 (59%)	1,3 (21%)	0,3 (10%)	0,5 19%
Klasse 3			2,6 (41%)	3,2 (51%)	0,3 (11%)	-?
Klasse 4					2,2 (79%)	2,2 (79%)

*) inclusief de fictief geïntroduceerde klasse 1 PAK (1 - 2,5 mg/kg ds)

**) exclusief de fictief geïntroduceerde klasse 1 PAK

De specie die op het proefveld “optimalisatie” werd aangebracht lijkt hiervan een voorbeeld te zijn. Er is wel een aanzienlijk aanbod van klasse 3 PAK- en olie-species (1,8 miljoen m³) die op lange termijn tot de fictief geïntroduceerde klasse 1 gereinigd kan worden (fictieve klasse 1 route). De vraag of bij een dergelijke restverontreiniging de grond weer geschikt geacht mag worden voor multifunctioneel gebruik is daarom zeer relevant voor het potentieel van het DLO-concept.

Een groot deel van de klasse 3/4 specie (ongeveer 4 miljoen m³) kan door middel van het DLO-concept omgezet en/of licht gereinigd worden tot categorie 1 bouwstof (bouwstof route). Onder de huidige regelgeving heeft het bedrijfsmatig gezien geen zin om het PAK-gehalte verder te verlagen dan de samenstellingswaarde. De bouwstofroute is daarom een korte termijn behandeling waarbij de baggerspecie ontwaterd en deels gerijpt wordt en waarbij het eerste snelle afbraakproces plaatsvindt. Bij de bouwstof

route kan ook wilg geteeld worden om de ontwatering en rijping van de specie te bespoedigen. Dit gewas wordt echter na ca. 3 - 4 jaar geoogst en opgeruimd. Vanuit de teelt bezien is dit inefficiënt en zou gezocht moeten worden naar een gewas met lagere aanplantkosten.

5.4.2 Kosten

De kosten van de verschillende opties zijn berekend. In tabel 20 zijn de resultaten samengevat. Uitgangspunten voor de berekening zijn in de tabellen 21 en 22 opgenomen. Samenvattend lijken drie verwerkingsroutes interessant om nader te beschouwen:

- achtergrondwaarde route (AW route; korte termijn) voor klasse 2 specie die niet op de kant gezet kan worden
- fictieve klasse 1 route (K1 route; lange termijn) voor klasse 3/4 specie
- bouwstofroute (BS route; korte termijn) voor klasse 3/4 specie

Tabel 20 Kosten en baten (in gulden per ton droge stof) van vier verwerkingsroutes voor baggerspecie in combinatie met wilgenteelt vanaf levering aan de poort tot en met eindbestemming.

	AW route	K1 route, 13 jr.	K1 route, 21 jr.	BS route
Kapitaalslasten	1,75	2,74	3,14	1,16
Grondkosten	1,50	2,16	3,50	0,67
Personeelskosten	4,76	5,43	6,53	6,02
Kosten derden specie	8,24	8,08	8,24	13,58
Kosten derden wilg	-	1,01	1,79	0,62
Analyse kosten	0,80	5,40	5,70	5,10
Totaal kosten	17,05	24,81	28,89	27,16
Baten uit wilg	-	1,23	2,23	0,33
Kosten – baten bij: winst en risico	17,05	23,58 (20%) 4,72	26,67 (20%) 5,34	26,82 (10%) 2,68
Kostprijs remediatie	17,05	28,30	32,01	29,50

Table 21. Technologische uitgangspunten verwerkingsalternatieven

Omschrijving	AW route	K1 route	BS route
Potentiële aanbod ($\times 1000 \text{ m}^3$ in situ)	1.120 (20%)	1.800	4.000
Gem. Uitleveringsfactor (m^3 gebaggerd / m^3 in situ)	1,2	1,2	1,2
Potentiële aanvoeraanbod voor reiniging ($\times 1000 \text{ m}^3$)	1.340	2.200	4.800
Aanvoer per jaar (m^3 ; gespreid over 20 jaar)	67.000	110.000	240.000
Drogestofgehalte verse specie (%)	35	35	35
Droge dichtheid verse specie (ton droge stof / m^3)	0,44	0,44	0,44
Natte dichtheid verse specie (ton/m^3)	1,25	1,25	1,25
Aanvoer per jaar (ton nat; excl. zwerfvuil)	83.800	137.000	300.000
Aanvoer per jaar (ton droge stof; excl. zwerfvuil)	29.400	48.000	106.000
Verwerkingslocatie	Boerenbedrijf	terrein op bestaand bedrijf	Terrein op bestaand bedrijf
Combinatie met wilgenteelt	Nee	ja	Ja
Methode	Specie na oogst aanbrengen	specie tussen wilg aanbrengen	Specie tussen wilg aanbrengen
Aantal verwerkingslocaties binnen gebied HUS (per jaar)	5 per jaar	1	2
Gem. Afstand bagger – verwerkingslocatie (km)	10	50	30
Jaarlijkse aanvoer per locatie	m^3 verse specie	13.400	110.000
	Ton verse specie	16.800	137.000
	Ton drogestof	5.900	48.000
Aanvoermethode	Vacuüm pomp- tankwagen	vacuüm pomp- tankwagen	Vacuüm pomp- tankwagen
Gem. Aanvoer per dag (ton verse specie); 12 vrachten	360	360	360
Toedienmethode	Haspelinstallatie	Haspelinstallatie	Haspelinstallatie
Drogestofgehalte gerijpte specie (%)	85	85	85
Droge dichtheid gerijpte specie (ton droge stof / m^3)	1,25	1,25	1,25
Natte dichtheid gerijpte specie (ton/m^3)	1,55	1,55	1,55
Aantal toedieningen	1	3	3
Laagdikte verse specie per toediening (cm)	30	90	90
Toedieningsfrequentie	-	1 x per jaar	1 x per jaar
Totale laagdikte gerijpte specie (cm)	11	95	95
Totale verwerkingsduur (jaar)	1 jaar	10 en 20 jaar	4
Gem. Oppervlak ingebruikname per locatie per jaar (ha)	10	4,0	4,5
Ruimtebeslag (m^2 .jaar / ton droge stof)	7,8	8,3 en 16,6	3,4
Vergunningen	WM eenvoudig	WM, WVO	WM, WVO
Inrichting civiel	Onderafdichting	Nee	Nee
	Egalisatie	Nee	Ja
	Omdijking (m^3 grondverzet / ha)	Nee	Ja (700)
	Extra wegen	Nee	Nee
	Ontvangstinrichting	Nee	Eenvoudig
	Wijzigen waterloop	Nee	Ja
	Terreinhek	Nee	Ja
Inrichting mechanisch	Huur/loonwerk	Huur / loonwerk	Huur / loonwerk

Table 22 *Uitgangspuntencalculatie exploitatiekosten (per locatie en per jaar)*

Omschrijving	AW route	K1 route 13 jaar	K1 route 21 jaar	BS route
Inzet personeel speciereiniging (dagen / jaar)				
Bedrijfsleiding		60	107	120
Agrariër	20			
Milieukundig		60	70	60
Uitvoering (ontvangst, toediening, veldwerk)	39	357	357	395
Administratie		80	100	60
Inzet huur en loonwerk (dagen / jaar)				
Toedienen baggerspecie	Ja	Ja	ja	Ja
Alle veldwerk wilgenteelt	n.v.t.	Ja	ja	Ja
Laden gereinigde grond	Nee	Nee	nee	Ja
Afvoer grond van het terrein	Nee	Nee	nee	Ja
Aantal monsters voor chemische analyse specie				
Inkeuring (aantal per 1000 ton droge stof)	1	2	2	2
Monitoring (aantal per 1000 ton droge stof)	0	4	6	2
Uitkeuring (aantal per 1000 ton droge stof)	0	2	2	2

6 Conclusies en aanbevelingen

Het DLO-concept voor de biologische reiniging van waterbodem die met PAKs en olie is verontreinigd legt gedurende geruime tijd beslag op ruimte. De ruimte wordt benut voor de teelt van biomassa voor energiewinning. Het onderzoek was gericht op het verkrijgen van inzicht in toepassingsmogelijkheden van dit concept. In dit hoofdstuk worden conclusies gepresenteerd die na een jaar onderzoek getrokken kunnen worden

6.1 Onderzoek

Het concept reinigen van baggerspecie en de teelt van biomassa voor de energieteelt is een langjarige gebruik van een locatie. Doel van deze toepassing is door meervoudig bodemgebruik de verbetering van bodemcondities voor biologische afbraak van PAKs en olie, het verlagen van saneringskosten en een economische toepassing van energieteelt. Het in deze rapportage gepresenteerde onderzoek is de weerslag van het eerste onderzoek jaar. De conclusies in dit hoofdstuk zijn globaal, meer gedetailleerde conclusies zijn te vinden in de afzonderlijke hoofdstukken. De onderzoeksvragen betroffen de volgende aspecten

- Potentiële hoeveelheid reinigbare baggerspecie
- Toediening
- Ontwatering en rijping
- Risico's
- Verspreiding
- Ecotoxicologische effecten
- Mogelijkheid en mate van afbraak PAK en olie
- Interactie wilgen baggerspecie

6.2 Potentieel reinigbare hoeveelheid baggerspecie

Op basis van een databestand van Het Hoogheemraadschap van Uitwaterende Sluizen m.b.t. de kwaliteit van baggerspecie is vastgesteld dat een grote hoeveelheid baggerspecie voor extensieve biologische reiniging in aanmerking komt. Afhankelijk van de normen voor te realiseren eindkwaliteit, blijkt dat van de klasse 2 species op basis van PAK, 43% kan worden verbeterd tot klasse 0 en de fictieve klasse 1 (grenswaarde 2,5 mg PAK-10/kg ds). Van de huidige klasse 3 kan ca. 60% omgezet worden naar klasse 2 en van de hoeveelheden in klasse 4 kan 10% worden omgezet naar klasse 2 en 11 % naar klasse 3. Deze klasse wordt vooral bepaald door de gehalten aan zware metalen. De methodiek is toepasbaar op alle LAWABO-bestanden. Op basis van theoretisch berekeningen is geconcludeerd dat na sanering van de

waterbodems er als gevolg van herverontreiniging plaatselijk weer klasse 3 en 4 waterbodem wordt gevormd. Voor die locaties wordt aanbevolen om een nader onderzoek in te stellen naar de aanwas en samenstelling van waterbodem en de belastingsgraad.

6.3 Toediening

In de combinatie van baggerspecie reiniging en energieteelt kunnen wilgen worden ingeplant in een (deels)ontwaterde specie of kan de specie worden aangebracht in een bestaand wilgenbestand. In dit onderzoek is gekozen voor de eerste optie om de ontwateringsfase over te slaan en voor afloop van het NOBIS-programma (gepland op dec. 1998) resultaten te kunnen hebben. Gestart is met steekvaste baggerspecie waarin wilgen zijn ingeplant. De optie waarbij bagger in een bestaande teelt wordt aangebracht is minder uitgebreid onderzocht.

Gebleken is dat het goed mogelijk is om natte baggerspecie met pompen te verspreiden in een al bestaande wilgenteelt. Wilgen komen goed tot ontwikkeling en deze variant biedt daarom het meeste perspectief voor de toekomst, te meer omdat in dit onderzoek de ontwikkeling van de ingeplante wilg in het eerste jaar zeer matig bleek. Als nadeel is opgevallen dat door de vorming van veel zijscheuten het plantverband (rijen) verloren gaat waardoor machinale oogst problematisch wordt. Aanbevolen wordt om de natte specie in een keer toe te dienen aan een éénjarige wilgengewas.

6.4 Verspreidingsrisico's

Verspreiding van verontreiniging naar de bodem, grond- en oppervlakte water is volgens de metingen niet opgetreden. Verspreiding in het grondwater is wegens de grote lokale kwel (3 keer neerslagoverschot) niet waarschijnlijk.

In de waterfase in de bodem direct onder de specie is een verhoogd zinkgehalte aangetroffen. Dit is hoogstwaarschijnlijk geen zink uit de specie, maar zink dat van nature in deze gronden voorkomt. Het overmaat aan

water dat uit de baggerspecie in de bodem is geïnfiltreerd heeft een ander zoutgehalte en zuurgraad dan het bodemvocht. Dit heeft zeer waarschijnlijk geleid tot een verhoging van het zoutgehalte en een verlaging van de pH in het bodemvocht. Een verschuiving van het oorspronkelijk evenwicht tussen de opgeloste fractie en de fractie die aan de bodem is gebonden is dan waarschijnlijk. De groter oplosbaarheid van zink in de waterfase laat zich daardoor verklaren. Aanbevolen wordt om deze verschuiving experimenteel te kwantificeren. In hoeverre een grotere oplosbaarheid uiteindelijk leidt tot een herverdeling in de bodem en mogelijk ook tot uitspoeling van de al aanwezige zink is nog onduidelijk. Duidelijk is wel dat onjuiste interpretatie van deze waarnemingen ten onrechte tot de conclusie kan leiden dat uitloging van de baggerspecie heeft plaats gevonden. Nader onderzoek aan het fenomeen van herverdeling van de van nature aanwezige contaminanten onder invloed van veranderingen in het zoutgehalte en zuurgraad van het bodemvocht wordt dan ook aanbevolen.

6.5 Ontwatering en rijping

Het jaar 1998 is zeer nat geweest waardoor de specie minder ver ontwaterd en gerijpt is dan in een normaal jaar mag worden verwacht. Desondanks is de rijping voortgeschreden. Uit theoretische berekeningen, waarbij gemeten eigenschappen van de baggerspecie zijn gebruikt, is gebleken dat de interactie tussen de wilg en baggerspecie goed te kwantificeren is. Geconcludeerd is dat de laagdikte van baggerspecie in combinatie met ondiep wortelende gewassen beperkt moet blijven, terwijl de combinatie van een dunne laag met diep wortelende gewassen niet efficiënt is. Berekend is dat baggerspecie zoals die in dit onderzoek is toegepast, in een laag van 0,9 m kan worden toegepast, waarna de wilg na ca. 3 jaar machinaal kan worden geoogst. De theoretisch benaderingen lijken goed aan te sluiten bij de waarnemingen. Aanbevolen wordt om de rekenprocedures verder te valideren met resultaten van onderzoek op de EUROJOULE-locatie.

6.6 Ecotoxicologische effecten

Het bestaan van ecologische risico's is bepaald met bioassays met regenwormen. Mortaliteit is in geen van de uitgevoerde bioassays waargenomen, maar men zou kunnen spreken van sub-letale effecten gelet op de geringere toename in lichaamsgroei en coconproductie van wormen in baggerspecie. Zou deze situatie blijven bestaan, dan zou de

populatieontwikkeling van regenwormen in de specie in negatieve zin kunnen worden beïnvloeden. Niet uitgesloten moet worden dat andere factoren zoals de matig ontwikkelde bodemstructuur in de baggerspecie en het gelijktijdig naast elkaar voorkomen van aërobe en anaërobe situaties een nadelig effect hebben. De keuze van de referentiegrond luistert derhalve erg nauw. Voor de beoordeling van lange termijn effecten is de onderzoeksperiode tekort geweest. Er wordt een vervolgmonitoring en verdere analyse van risico's aanbevolen.

6.7 Mogelijkheid en mate van afbraak PAK en olie

In de ontwaterde baggerspecie waren de omstandigheden zodanig, dat biologische afbraak mogelijk en de zuurstofaanvoer niet beperkend was. Als gevolg van de beperkte structuurontwikkeling en het voorkomen van relatief grote aggregaten bestaan er in de specie naast elkaar aërobe en anaërobe situaties. Vermoed wordt dat in een dunne schil rond anaërobe aggregaten aërobie voorkomt, waarin afbraak voorkomt. De afbraaksnelheid zou daarom kunnen samenhangen met het oppervlak (en volume) van de aërobe schil en dus met de aggregatiegraad. In 1998 is geen significante afbraak van PAKs en olie in het veld gemeten. Wel vond er binnen de PAKs een verschuiving in samenstelling plaats, hetgeen duidt op biologische omzetting.

Met biologische toetsen op het laboratorium is voorspeld dat de afbraak van PAK en minerale olie niet significant zou zijn. Dit is bevestigd met de waarnemingen in het veld. De langzame afbraak is passend in het hier onderzochte concept. Voor het voorspellen van de duur van de reiniging zou moeten worden uitgegaan van een meerjarige reeks, waarin voldoende daling gemeten zou worden. Gezien de spreiding van de gehalten in het veld zou bovendien intensief bemonsterd moeten worden. De uitgangssituatie is zodanig goed vastgelegd dat met verdere monitoring met intervallen van een jaar en gekoppeld aan afbraakcondities, de biologische afbraaksnelheid kan worden bepaald.

Directe meting van de beschikbare fractie i.p.v. geringe en moeilijk vast te stellen afname in een relatief korte tijd, kan meer inzicht geven in de voor afbraak nodige tijd. Hiervoor zijn recent methoden beschikbaar gekomen (Doddema et al., 1998 en Cornelissen et al., 1997). Deze methoden zijn getoetst op de landfarm Kreekraaksluizen en bieden perspectief (Harmsen et al., 1999)

Aanbevolen wordt de monitoring te continueren en deze te koppelen aan de monitoring van afbraakcondities. Een verdere toetsing van de beschikbaarheidstesten aan werkelijk gemeten afbraaksnelheden, in combinatie met een nadere analyse van de invloed van de aggregatiegraad in de bodem wordt aanbevolen om meer grip te krijgen op de afbraak kinetiek.

6.8 Interactie wilg en baggerspecie

De wortelontwikkeling van de wilgen die in het voorjaar van 1998 zijn ingeplant is nog onvoldoende om te kunnen spreken van interactie. De ontwikkeling van de wilg in baggerspecie is minstens gelijk aan de ontwikkeling in het referentieveld (zonder baggerspecie). Een relatie met de dikte van de baggerspecielaag, die varieerde van 0,25 tot 0,75 m werd niet gevonden. In het veld met ontwaterde specie concentreerde de beworteling zich direct rond de stekken. In de velden waar natte specie in een bestaand wilgengewas was aangebracht, werden veel nieuwe wortels gevormd.

De bijgroei van de pas ingeplante stekken viel tegen, hetgeen is veroorzaakt door de slechte aanloop condities (droogte gevolgd door overmatige regenval en verder door de aantasting door het wilgen haantje. Gevolgd door een schimmelaantasting. Gebleken is dat niet elke wilgenras even vraatgevoelig is. Waarschijnlijk is inplant van wilgen van verschillende ras aan te raden om de plaagdruk te beperken.

De bijgroei van het reeds bestaand wilgengewas op de velden met (natte) baggerspecie was vergeleken met de normale bijgroei op het referentie veld, spectaculair (het dubbele tot het drievoudige).

Aanbevolen wordt om de wortelontwikkeling en ontwikkeling van de wilg op de velden met natte en steekvaste verder te monitoren.

6.9 Laagdikte

De toe te passen laagdikte is benaderd door enerzijds te eisen dat volledige rijping gerealiseerd moet worden en tevens dat ook in perioden met een gemiddeld neerslagoverschot de afbraakcondities op peil blijven. Voor de baggerspecie die in dit onderzoek is gebruikt (17% lutum, 7,5% organische stof), zou, afhankelijk van de grootte van de zuurstofdiffusiecoëfficiënt, de laagdikte 0,4 tot 0,9 m mogen bedragen op basis van gerijpte grond.

6.10 Ontwateringseis

Afbraakcondities worden op peil gehouden met een goede ontwatering. Daarbij dient te worden gestreefd naar een afstand van 0,2 – 0,4 m (zand...klei) tussen de onderzijde van de baggerspecie en de grondwaterspiegel bij afvoer van het gemiddeld neerslagoverschot. Als vuistregel voor het aan te houden slootpeil, waarbij er van is uitgegaan dat het ontwateringssysteem voor ca. 60-70% volgens de ontwerpnorm functioneert, kan de het slootpeil (onder de bovenzijde van de baggerspecielaag in gerijpte toestand) worden benaderd met de formule: slootpeil = {dikte baggerspecielaag + (0,2 – 0,4) + 0,2} m. Deze eis betekent dat locaties met een polderpeil van minder dan 0,4 – 0,6 m –mv waarschijnlijk ongeschikt zijn. In gebieden met slappe ondergronden moet bovendien rekening worden gehouden met zettingen.

6.11 Toepasingsperspectief

De perspectieven van het DLO-concept worden bepaald door de te realiseren eindkwaliteit en de gebruiksbestemming van de gereinigde baggerspecie.

Als de huidige klasse 2 specie niet op de kant kan of mag worden verwerkt, hetgeen vanuit de goedkoopste oplossing is, kan 40% van de hoeveelheid in die klasse verbeterd kunnen worden tot klasse 0 en een fictieve klasse 1 (bovengrens 2,5 mg PAKs VROM-10 per kg ds). Van hoeveelheid in klasse 3 kan ca. 30% na een relatief lange periode worden verbeterd tot klasse 0. Verbeteringsmogelijkheden van de klasse 4 specie zijn beperkt omdat daarin behalve de recalitrante PAKs vooral zware metalen voorkomen die de klasse-indeling bepalen. Van deze klasse ondergaat ca. 10% een verbetering tot klasse 2 en nog eens 10% tot klasse 3.

Uit het onderzoek is (voorlopig, want na een jaar) geconcludeerd dat er geen verspreiding van verontreiniging vanuit de baggerspecie plaats vindt naar de bodem, het grond- en oppervlakte water. Gelet op de daarmee verbonden zeer geringe risico's is het gerechtvaardigd dat vloeistofdichte voorzieningen achterwege blijven.

Ecologische risico's bleken bij de onderzochte baggerspecie vrijwel afwezig en worden gelet op de bioassay met regenwormen ook niet verwacht. Er kan van worden uitgegaan dat ecologische risico's aanvaardbaar zijn.

Afgaande op dit onderzoek waarin risico's nagenoeg ontbreken zou men kunnen

concluderen dat de noodzaak ontbreekt om gereinigde baggerspecie te verwijderen en verwijderingskosten dus niet gemaakt hoeven te worden.

Als in het algemeen zou worden onderschreven dat in de toekomst meer zal worden uitgegaan van risico benadering, zou men anticiperen bij de locatiekeuze van landfarms daar nu al op kunnen door daarbij aansluiting te zoeken bij voorziene ruimtelijke ontwikkelingen en de inrichting en bestemming van de landfarm daarop af te stemmen. Sanering van waterbodems zou daarmee een plaats kunnen verwerven in het proces van ruimtelijke ordening en planvorming.

Uit globale berekeningen is gebleken dat na verwijdering van verontreinigde baggerspecie nog steeds aanwas van klasse 3 en 4 specie verwacht mag worden zolang verschillende bronnen van vervuiling niet gesaneerd zijn. Dit pleit er tevens voor om de planning van de sanering van de waterbodem te integreren met programma's voor het verbeteren van de oppervlaktewaterkwaliteit.

6.12 Kosten

Afhankelijk van de uitgangskwaliteit en de te realiseren eindkwaliteit lopen de kosten uiteen. Behandeling van de klasse 2 die als multifunctionele grond kan worden afgezet of hergebruikt, kost in het DLO-concept ca. f17,= per ton droge stof. De kosten van de reiniging van klasse 3 en 4 bedragen afhankelijk van de behandelduur f28,= tot f32,= per ton droge stof. Wordt de bagger echter als bouwstof afgezet, dan blijft de behandelingsduur beperkt en wordt hoofdzakelijk bepaald door de benodigde tijd voor afbraak van minerale olie. De behandeling van klasse 3 volgens het DLO-concept en afzet als bouwstof kost dan ca. f30,= per ton droge stof. In dat geval wordt de wilg na een oogst tegelijk met de baggerspecie geruimd. De kosten van de aanplant drukken dan onevenredig zwaar op de behandelkosten. Op de kosten kan dan nog worden bespaard door een ander gewas in te planten.

De behandelkosten zijn alleen gebaseerd op de behandeling op de landfarm. In de kosten zijn geen risico's reserveringen opgenomen voor calamiteiten zoals onvoorziene afvoer en storten, en onvoorziene bodemsanering.

Literatuur

- Adviesdienst voor Verkeer en Vervoer (AVV), 1993. *Basisnet*. Rijkswaterstaat
- prill, W. and Sims, R. C., 1990. Evaluation of the use of prairie grasses for stimulating polycyclic aromatic hydrocarbon treatment in soil. *Chemosphere* 20: 253-265.
- Bakker, T en R. Venema, 1997. *Waterbodem Beoordeling Ondersteunend Systeem, BOOS, versie o.4, Gebruikershandleiding (voorlopige uitgave)*. RIZA, Lelystad
- Boels, D., J.B.H.M/ van Gils, G.J. Veerman and K.E. Wit, 1978. Theory and system of automatic determination of soil moisture characteristics and unsaturated hydraulic conductivity. *Soil Sci.*, 126: 191-199
- Boels, D. en K. Oostindie, 1991. RIJPING, a simulation model for the calculation of waterbalance, ripening, crack formation and surface subsidence of clay sludge. Wageningen, DLO-Staring Cnetrum, Manual Version 1.0
- Boels, D., J.H. van den Akker en A.H. van der Toorn, 1998. *Kwaliteitsverbetering van baggerspecie op basis van extensieve biosrestauratie in combinatie met energieteelt. Fysische monitoring*. Wageningen, DLO-Staringcentrum, NOBIS 96-1-02 Onderzoekverslag 6.
- Doddema H. J., M.P. Cuypers, G.B. Derksen, J.T.C. Grotenhuis, M.P. Harkes, J. Harmsen, W.H. Rulkens en A.J. Zweers, 1998. *Karakterisering van met PAK verontreinigde baggerspecie voor biologische reiniging*. STOWA rapport, 98.32.
- Emissie registratie Collectief, 1991. *Lokatie van overstorten*
- Gigler, J.K., J.V. van den Berg en C. Sonneveld, 1998. Opbrengstgegevens van het energiegewas wilg (*Salix viminalis*) voor het proefjaar 1996. Wageningen, IMAG-DLO, Nota V 98-68.
- Guchte, C. van de, H. Eijsackers, P.J. den Besten, C.A.M. van Gestel, T. Aldenberg, T.P. Traas en P.C. de Ruiter, 1996. *Ecotoxicologische risicobeoordeling van verontreinigde (water)bodems. Hoe verder?*. Wageningen, Programma Geïntegreerd Bodemonderzoek, Deel 2
- Harmsen, J., G.D. Vermeulen, J. Hoeks, K. Otten, M.C.G. Klaus, J. Joziase en L. Feenstra, 1997. Definitiestudie biologische reiniging baggerspecie. CUR/NOBIS, Gouda, NOBIS-rapport 96-1-02, 54 p. + bijlagen.
- Harmsen J., J.J.H. van de Akker, A.G.C. Beurskens, O.M. van Dijk-Hooyer, W. Ma en H.J.J. Wieggers, 1996. *Mogelijkheden van extensieve landfarming voor biologische reiniging van grond*. Reeks Schone technologie DV3,ST.02, NOVEM, Utrecht
- Harmsen J., A van den Toorn, O.M. van Dijk-Hooyer, H.J.J. Wieggers en A.J. Zweers, 1999. *Haalbare productkwaliteit en restrisico's bij extensieve landfarming van baggerspecie*. SC-DLO rapport (in voorbereiding).
- Harmsen, J., A. van der Toorn, O.M. van Dijk-Hooyer, H.J.J. Wieggers, E.J.W. Raben en C.A.T. Egging, 1998. *Kwaliteitsverbetering van baggerspecie op basis van extensieve biosrestauratie in combinatie met energieteelt. Risico's van verspreiding van PAK en zware metalen*. Wageningen, DLO-Staringcentrum, NOBIS 96-1-02 Onderzoekverslag 5.
- Harmsen J. en R. Kampf, 1998. *Kwaliteitsverbetering van baggerspecie op basis van extensieve biosrestauratie in combinatie met energieteelt Een methodiek voor bepaling aanbod van baggerspecie voor extensieve biologische reiniging*. Wageningen, DLO-Staringcentrum, NOBIS 96-1-02 Onderzoekverslag 1.
- Kramer, P.R.G., A.M.Huizing, J.E.M. Beurskens, T. Aldenberg, 1997. *Verkenning regionale wateren. Huidige en toekomstige gehalten van PAK in slootbodems*. RIVM rapport nr. 733007001, Stowa rapport nr. 96-28, Bilthoven

- Kampf, R., 1998. *Databestand kwaliteit waterbodems in het Hoogheemraadschap Uitwaterende Sluizen in Hollands Noorderkwartier*. Hoogheemraadschap Uitwaterende Sluizen in Hollands Noorderkwartier, Edam
- Kim, J.D., H. Vereecken, J. Feyen, D. Boels and J.B. Bronswijk, 1992a. On the characterisation of properties of an unripe marine clay soil. I Shrinkage processes of an unripe marine clay soil in relation to physical ripening. *Soil Sci.*, 153: 471-482.
- Kim, J.D., H. Vereecken, J. Feyen, D. Boels and J.B. Bronswijk, 1992b. On the characterisation of properties of an unripe marine clay soil. II A method on the determination of hydraulic properties. *Soil Sci.*, 154: 59-72.
- Kim, J.D., 1992. "Characterisation of swelling and shrinkage behaviour, hydraulic properties and modelling of watermovement in a physical ripening marine clay soil". Leuven, Katholieke Universiteit, Fakulteit der Landbouwwetenschappen, Doctoraatsproefschrift Nr. 218
- Ma, W.C., 1998. *Kwaliteitsverbetering van baggerspecie op basis van extensieve biosrestauratie in combinatie met energieteelt. Ecologische risico's*. Wageningen, DLO-Instituut voor Bos en Natuuronderzoek, NOBIS 96-1-02 Onderzoekverslag 7.
- Noordman, e., H.A.M. Thunissen, H. Kramer, 1997. *Vervaardiging en nauwkeurigheid van het LGN2-grondgebruiksbestand*. SC-DLO rapport 515, Wageningen.
- Puijtenbroek, P van, R.Kampf, 1998. *Een analyse met GIS van de invloed van diffuse belasting met PAK op de waterbodems kwaliteit in het Hollands Noorderkwartier*. RIVM-rapport nr. 715651011, Bilthoven
- Rijniersce, K. 1983. *Een model voor de simulatie van het fysische rijpingsproces van gronden in de IJsselmeerpolders*. Proefschrift Landbouwhogeschool te Wageningen, tevens verschenen als Van Zee tot Land no. 52. 156 p.
- RIZA, 1999. *Basisrapport Waterbodems* (in afronding), RIZA, Lelystad
- SC-DLO, 1997. *Intensieve landfarming van verontreinigde baggerspecie*. POSW-rapportage deel 32, RIZA rapport 97.071.
- SC-DLO, 1997. Mogelijkheden van extensieve landfarming voor biologische reiniging van baggerspecie. POSW-rapportage deel 33, RIZA rapport 97.072.
- Schwab, A.P. and Banks, M.K., 1994. Biologically mediated dissipation of polyaromatic hydrocarbons in the root zone. In: T.A. Anderson and J.R. Coats (eds.), 1994. *Bioremediation through rhizosphere technology*. American Chemical Society, Washington, DC, pp. 132-141.
- Terry, R.E., 1998. Use of soil conditioners to enhance and speed bioremediation of contaminated soils. In: A. Wallace and R.E. Terry (eds.), 1998. *Handbook of soil conditioners*, Marcel Dekker inc., New York, pp. 551-573.
- Toorn, A. van den, J. Harmsen, O.M. van Dijk Hooyer, 1996. *Natuurlijke afbraak van Polycyclische Aromatische Koolwaterstoffen bij het op de kant zetten van baggerspecie op Goeree-Overflakkee*. SC-DLO rapport 447, Wageningen
- Toorn A. van den, J. Harmsen en O.M. van Dijk-Hooyer, 1996. *Natuurlijke afbraak van polycyclische aromatische koolwaterstoffen bij het op de kant zetten van baggerspecie op Goeree-Overflakkee*. SC-DLO rapport 447.
- Vermeulen, G.D., P.J. Goedbloed, J.Harmsen, P.N. Duijn en D. Boels, 1998. *Kwaliteitsverbetering van baggerspecie op basis van extensieve biosrestauratie in combinatie met energieteelt. Terreininrichting en proefopzet*. Wageningen, EuroJoule (DLO en De Vries & van de Wiel), NOBIS 96-1-02 Onderzoekverslag 1.

Vries, F., 1993. *Een fysisch-chemische karakterisering van de eenheden van de Bodemkaart van Nederland schaal 1 : 250 000*. SC-DLO rapport 265, Wageningen

Waarde J.J. van der, J. Brils, J.G.M. Derksen, E.E. van der Hoek, M.F.X.W. Veul en C.A.M. van Gestel, 1998. *Effectiviteit van bioassays bij het monitoren en beoordelen van het milieurendement van in-situbiorestauratie; Fase 1, deelresultaat 1: Inventarisatie en selectie van bioassays en extractiemethoden voor grond verontreinigd met minerale olie*. Gouda, Nederlands Onderzoeksprogramma Biotechnologische In-situ Sanering, NOBIS 96-1-13

Waterstaatkundig Informatie Systeem (WIS, 1995)