

NOBIS 96-3-07
HAALBAARHEIDSONDERZOEK DEPOTREINIGING VAN BAGGERSPECIE: VERSNELLING VAN HET RIJPINGSproces MET WARMTE

ir. J.J. Steketee (Tauw bv)
ir. W.J. Huisman (Tauw bv)

juni 2000

Gouda, CUR/NOBIS

Auteursrechten

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

Het is toegestaan overeenkomstig artikel 15a Auteurswet 1912 gegevens uit deze uitgave te citeren in artikelen, scripties en boeken mits de bron op duidelijke wijze wordt vermeld, alsmede de aanduiding van de maker, indien deze in de bron voorkomt, "©"Haalbaarheidsonderzoek depotreiniging van baggerspecie: versnelling van het rijpingsproces met warmte", juni 2000, CUR/NOBIS, Gouda."

Aansprakelijkheid

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

Copyrights

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

It is allowed, in accordance with article 15a Netherlands Copyright Act 1912, to quote data from this publication in order to be used in articles, essays and books, unless the source of the quotation, and, insofar as this has been published, the name of the author, are clearly mentioned, "©"Feasibility study on the ripening and remediation of dredging spoil: enhancing the process using heat", June 2000, CUR/NOBIS, Gouda, The Netherlands."

Liability

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

Titel rapport

Haalbaarheidsonderzoek depotreiniging van bagger-
specie: versnelling van het rijpingsproces met warmte

CUR/NOBIS rapportnummer

96-3-07

Project rapportnummer

96-3-07

Auteur(s)

ir. J.J. Steketee
ir. W.J. Huisman

Aantal bladzijden

Rapport: 90
Bijlagen: 15

Uitvoerende organisatie(s) (Consortium)

Tauw bv (ir. J.J. Steketee, 0570-699564)
Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde (W.M. Polderman, 015-2518372)
Rijkswaterstaat, Directie Limburg (ing. M. Thyssen, 043-3294444)
Elektriciteits Productiemaatschappij Zuid-Nederland (ir. J.G. Arends, 040-2503265)
Alterra (dr. J. Harmsen, 0317-474360)

Uitgever

CUR/NOBIS, Gouda

Samenvatting

Dit rapport beschrijft de resultaten van een onderzoek naar de haalbaarheid van versnelde rijping van baggerspecie met behulp van (rest)warmte. Door verwarming tot een temperatuur die gemiddeld 5 °C boven de temperatuur in een referentiedepot ligt, worden de fysische, chemische en biologische rijpingsprocessen globaal met een factor 2 versneld. Geconcludeerd wordt dat deze optie technisch en economisch haalbaar is. De kosten zijn vergelijkbaar met traditionele rijping, terwijl het ruimtebeslag een factor 2 lager wordt.

Trefwoorden**Gecontroleerde termen:**

baggerspecie, biologische afbraak, uitloging, verwarming

Vrije trefwoorden:

depot, rijping

Titel project

Haalbaarheidsonderzoek depotreiniging van bagger-
specie: versnelling van het rijpingsproces met warmte

Projectleiding

Tauw bv
(ir. J.G. Cuperus, 0570-699830)

Dit rapport is verkrijgbaar bij:

CUR/NOBIS, Postbus 420, 2800 AK Gouda

Report title

Feasibility study on the ripening and remediation of dredging spoil: enhancing the process using heat

CUR/NOBIS report number

96-3-07

Project report number

96-3-07

Author(s)

ir. J.J. Steketee
ir. W.J. Huisman

Number of pages

Report: 90

Appendices: 15

Executive organisation(s) (Consortium)

Tauw Consultants bv (ir. J.J. Steketee, 0570-699564)
Department of Waterways and Public Works, Road and Hydraulic Engineering Division (W.M. Polderman, 015-2518372)
Department of Waterways and Public Works, Limburg Directorate (ing. M. Thyssen, 043-3294444)
Power Production Company Zuid-Nederland (ir. J.G. Arends, 040-2503265)
Alterra (dr. J. Harmsen, 0317-474360)

Publisher

CUR/NOBIS, Gouda

Abstract

This report describes the results of an investigation into the feasibility of enhanced ripening of dredging spoil using (residual) heat. Heating the material to a temperature of an average 5 °C higher than that measured in a reference depot proved to accelerate the physical, chemical and biological ripening processes involved by a factor 2. The study concludes that enhancing sediment ripening using heat is a technically and economically viable option. At costs comparable to those of conventional ripening, enhanced ripening will require only half of the space needed for conventional ripening.

Keywords**Controlled terms:**

biodegradation, dredging spoil, heating, leaching

Uncontrolled terms:

depot, ripening

Project title

Feasibility study on the ripening and remediation of dredging spoil: enhancing the process using heat

Projectmanagement

Tauw Consultants bv
(ir. J.G. Cuperus, 0570-699830)

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

INHOUD

		SAMENVATTING	vi
		SUMMARY	x
Hoofdstuk	1	INLEIDING	1
	1.1	Achtergrond	1
	1.2	Concept van het proces	1
	1.3	Doelstellingen	2
	1.4	Opbouw van de rapportage	2
Hoofdstuk	2	BESTAANDE KENNIS EN KNELPUNTEN	3
	2.1	Samenvatting van bestaande kennis over het rijpingsproces van baggerspecie	3
	2.1.1	Rijpingsproces	3
	2.1.2	Veranderingen in de macrosamenstelling	3
	2.1.3	Uitvoering en snelheid van het rijpingsproces	5
	2.1.4	Milieuhygiënische kwaliteit van baggerspecie en veranderingen gedurende rijping	5
	2.1.5	Afbraak van organische verontreinigingen	6
	2.2	Verwijdering van zware metalen	7
	2.3	Effecten van warmte	8
	2.4	Knelpunten en aandachtspunten van het onderzoek	9
Hoofdstuk	3	OPZET VAN HET ONDERZOEK	13
	3.1	Inleiding	13
	3.2	Opzet van het laboratoriumonderzoek en warmteberekeningen	13
	3.3	Opzet van de veldproef	14
	3.4	Ontwerp van een praktijkdepot en kostenberekening	15
Hoofdstuk	4	LABORATORIUMONDERZOEK	17
	4.1	Aandachtspunten	17
	4.2	Materialen en methoden	18
	4.2.1	Monsterneming van de baggerspecie	18
	4.2.2	Karakterisering van het uitgangsmateriaal	18
	4.2.3	Bepaling van het maximale effect van temperatuurverhoging	18
	4.2.4	Bepaling van het drooggedrag en temperatuurprofiel	18
	4.2.5	Bepaling van de warmteparameters	19
	4.3	Resultaten	19
	4.3.1	Kwaliteit van het uitgangsmateriaal	19
	4.3.2	Temperatuureffecten op de kinetiek van rijping en eindkwaliteit	20
	4.3.3	Drooggedrag van de specie	25
	4.3.4	Bepaling van de warmteparameters	28
Hoofdstuk	5	WARMTEBEREKENINGEN	31
	5.1	Inleiding	31
	5.2	Warmtevraag	31
	5.3	Warmteaanbod	32
	5.4	Vergelijking warmtevraag en warmteaanbod	33

	5.5	Warmteberekeningen	34
	5.5.1	Uitgangspunten	34
	5.5.2	Orde van grootte van de warmtevraag	36
	5.5.3	Specietemperatuur bij directe inzet van koelwater	36
	5.5.4	Specietemperatuur bij gebruik van verwarmd koelwater	37
Hoofdstuk	6	VELDPROEF	39
	6.1	Aandachtspunten	39
	6.2	Materialen en methoden	39
	6.2.1	Monsterneming van de baggerspecie	39
	6.2.2	Proefdepot	39
	6.2.3	Bedrijfsvoering	40
	6.2.4	Registratie, veldmetingen en monsterneming	42
	6.2.5	Laboratoriumonderzoek	43
	6.2.6	Overzicht van werkzaamheden en meetfrequenties	44
	6.3	Resultaten	44
	6.3.1	Weersomstandigheden	44
	6.3.2	Karakterisering van het uitgangsmateriaal	47
	6.3.3	Versnelde rijpingstest	48
	6.3.4	Veldproef, veldwaarnemingen	50
	6.3.5	Verloop van de fysische rijping van de veldproef	53
	6.3.6	Verloop van de chemische rijping van de veldproef	54
	6.3.7	Redoxpotentiaal, pH en metalen	56
	6.3.8	Overzicht van kwaliteitsveranderingen en toetsing aan het Bouwstoffenbesluit	59
	6.3.9	Versnelling van de rijping door temperatuurverhoging	60
	6.3.10	Vergelijking van de chemische rijping per laag	61
	6.3.11	Verschillen tussen vak 2 en vak 3	61
	6.3.12	Kwaliteit van het drainwater	62
	6.3.13	Energieverbruik	62
	6.3.14	Temperatuurverloop in de specielaag	63
Hoofdstuk	7	ONTWERP VAN EEN PRAKTIJKDEPOT EN KOSTENBEREKENING	65
	7.1	Inleiding	65
	7.2	Depotontwerp	65
	7.2.1	Inleiding	65
	7.2.2	Modeldepot en aanbod van specie	65
	7.2.3	Uitvoering en gevolgen bij de traditionele rijping	66
	7.2.4	Uitvoering en gevolgen bij de versnelde rijping	66
	7.2.5	Uitgangspunten bij de dimensionering van de modeldepots	67
	7.2.6	Afvoer van het water	69
	7.2.7	Depotontwerp	70
	7.2.8	Menskracht en materieel	70
	7.3	Warmtevraag bij versnelde rijping	71
	7.3.1	Verwarmingsmedium	71
	7.3.2	Warmtevraag en warmtestromen	72
	7.3.3	Dimensionering van het verwarmingssysteem	73
	7.4	Investeringskosten	74
	7.4.1	Grondbeslag	74
	7.4.2	Aanlegkosten van het depot	75

	7.5	Exploitatiekosten	77
	7.5.1	Uitgangspunten van de exploitatieberekening	77
	7.5.2	Resultaten van de exploitatieberekening	78
	7.5.3	Invloed van de grondprijs	78
	7.5.4	Invloed van de warmtebehoefte	79
	7.5.5	Verwerkingskosten per m ³ te verwerken baggerspecie	80
Hoofdstuk	8	SAMENVATTING EN DISCUSSIE	81
	8.1	Laboratoriumonderzoek	81
	8.2	Warmteberekening	81
	8.3	Veldproef	82
	8.3.1	Effecten van verwarming	82
	8.3.2	Mechanismen van versnelling van de rijping	82
	8.3.3	Waarde van laboratoriumrijpingstests	83
	8.3.4	Evaluatie van de praktijkmonitoring	83
	8.3.5	Opties voor verdere optimalisatie van het rijpingsproces	84
	8.3.6	Perspectief van verwarming	84
	8.4	Beoordeling voor grootschalige toepassing	84
Hoofdstuk	9	CONCLUSIES	87
		LITERATUUR	89
Bijlage	A	WERKWIJZE EN RESULTATEN VAN BEPALINGEN VAN WARMTE-CAPACITEIT EN WARMTEGELEIDINGSCOËFFICIËNT	
Bijlage	B	ONTSTAAN EN BESCHIKBAARHEID VAN RESTWARMTE BIJ ELEKTRICITEITSCENTRALES	
Bijlage	C	BESCHRIJVING VAN HET COMPUTERMODEL VOOR WARMTE-BEREKENINGEN EN INPUTGEGEVENS	
Bijlage	D	SCHETSONTWERPEN VAN DE MODELDEPOTS	
Bijlage	E	INVESTERINGSBEREKENINGEN EN EXPLOITATIEBEREKENINGEN	

SAMENVATTING

Haalbaarheidsonderzoek depotreiniging van baggerspecie: versnelling van het rijpingsproces met warmte

Achtergrond en probleemstelling

In Nederland is naar schatting 130 - 150 miljoen m³ baggerspecie ernstig vervuild (klasse 3 en 4). De doelstelling van de Rijksoverheid is om in elk geval 20 % van deze specie een nuttige bestemming te geven. De belangrijkste, relatief goedkope, technieken hiervoor zijn zandscheiding en rijping. Rijping is geschikt voor meer kleiige (en venige) species, die niet te sterk verontreinigd zijn. Gedurende de rijping kunnen organische verontreinigingen worden afgebroken, zodat bij een beperkte overschrijding van de samenstellingsnormen van het Bouwstoffenbesluit (factor 2 - 3 voor minerale olie en factor 1 - 2 voor PAK) na rijping een toepasbare bouwstof kan worden geproduceerd.

Een nadeel van rijping is het ruimtebeslag. Rijping vindt plaats in depots, waarbij de laagdikte circa 1 m is en de duur 1 - 2 jaar. Bij grootschalige toepassing kan er een tekort aan depotcapaciteit ontstaan. Dit was de aanleiding om te kijken naar mogelijkheden om de behandelingstijd te verkorten. Een optie hiervoor is verwarming van de specie, waardoor zowel fysische, chemische als biologische processen worden versneld. De concrete aanleiding voor dit idee was het voorstellen van RWS Limburg om baggerspecie uit de Maas te gaan verwerken nabij de Clauscentrale van de Elektriciteits Productiemaatschappij Zuid-Nederland (EPZ). Restwarmte uit deze centrale zou mogelijk bruikbaar zijn om de gewenste versnelling van de rijping te bereiken. Er is daarom in NOBIS-kader een consortium gevormd, bestaande uit Rijkswaterstaat Directie Limburg, Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde, EPZ, Alterra en Tauw bv, met als hoofddoelstelling om de haalbaarheid van versnelde rijping van baggerspecie met (rest)warmte vast te stellen.

Doelstellingen

De technische en economische haalbaarheid van versnelde rijping van baggerspecie met behulp van warmte kan worden vastgesteld als de volgende subdoelstellingen worden bereikt:

1. bepalen van de mate waarin de verschillende rijpingsprocessen kunnen worden versneld, eventuele verschillen in temperatuuroptima van de diverse processen en het identificeren van het limiterende proces voor de duur van de rijping, zodat de overall verkorting van de rijpingsduur kan worden vastgesteld;
2. vaststellen of en hoe het proces moet worden gestuurd om (i) de verblijftijd te optimaliseren en (ii) eventuele negatieve bij-effecten van verwarming, zoals uitdroging, te voorkomen;
3. bepalen van de optimale depottemperatuur en het vereiste niveau van de temperatuur (of de warmte-inhoud) van de toe te voeren (rest)warmte;
4. bepalen van de optimale wijze waarop de specie kan worden verwarmd (uitvoeringstechniek);
5. berekenen van de economische haalbaarheid door middel van een kosten-batenanalyse.

Fasering en opzet van het onderzoek

Het onderzoek is in drie fasen uitgevoerd:

Fase I: Laboratoriumonderzoek en warmteberekeningen.

Fase II: Veldproef.

Fase III: Ontwerp van een praktijkdepot en kostenberekening.

In fase I zijn de volgende werkzaamheden uitgevoerd:

- a. beknopte beschouwing van bestaande kennis en mogelijke knelpunten;
- b. selectie van materiaal voor de proeven: alle proeven zijn uitgevoerd met specie uit de Maas bij Belfeld (sluizencomplex);
- c. inventarisatie van de beschikbaarheid van restwarmte bij elektriciteitscentrales (locaties, hoeveelheden, temperatuurniveau);
- d. laboratoriumonderzoek naar de effecten van verwarming op de fysische en chemische rijping bij verschillende temperaturen met als doel om inzicht te krijgen in maximale effecten van verwarming op verschillende rijpingsreacties en het optimum van de temperatuur;
- e. bepaling van enkele belangrijke kengetallen van de specie, met name de warmtecapaciteit en de warmtegeleiding;
- f. berekening van de warmtevraag gedurende een rijpingscyclus.

De opzet van fase II was om de effecten van verwarming op semi-praktijkschaal te onderzoeken. Hiertoe werden in de buitenlucht drie depots ingericht met een inhoud van elk 2 m³. Het temperatuurregime in deze depots was als volgt:

1. referentie: onverwarmd;
2. matig verhoogde temperatuur: temperatuur gemiddeld 5 °C boven de specietemperatuur in de referentie;
3. verhoogde temperatuur: temperatuur gemiddeld 10 °C boven de specietemperatuur in de referentie.

De rijping in deze depots werd gedurende 9 maanden intensief gevolgd door regelmatige inspectie, monsterneming en analyse. Hierdoor kon het effect van verwarming op het verloop van processen als ontwatering, zwaveloxidatie en afbraak van minerale olie in beeld worden gebracht. Tevens is een vergelijking uitgevoerd met de resultaten van een versnelde rijpingstest, die in het laboratorium is uitgevoerd.

Tenslotte is in fase III op basis van de resultaten van de veldproef een ontwerp gemaakt van een praktijkdepot, met en zonder verwarming. Bij een gelijkblijvende capaciteit van het depot is het vereiste oppervlak kleiner, zodat de grondkosten lager worden. Verder zijn er besparingen door een kleinere hoeveelheid afvalwater en een iets kleinere hoeveelheid eindproduct. Daartegenover staan investeringen in het verwarmingssysteem en kosten voor inkoop en het transport van warmte. Op basis van deze analyse is de economische haalbaarheid van verwarming beoordeeld.

Resultaten

Fase I: Laboratoriumonderzoek en warmteberekeningen

Zowel de fysische rijping (droging), de macrochemische omzettingen als de afbraak van organische microverontreinigingen worden versneld door verhoging van de temperatuur. Opmerkelijk is dat bij de hogere temperaturen zink, dat door de rijping eerst wordt gemobiliseerd, in sterkere mate weer wordt vastgelegd. De verschillende chemische en biologische reacties verlopen bij 30 °C een factor 2 - 4 sneller dan bij 10 °C (slurrysysteem). De fysische rijping verloopt bij verwarming met water van 40 °C van onderaf een factor 1,6 sneller dan bij kamertemperatuur. Op basis van de laboratoriumproeven lijkt versnelling van de rijping in de praktijk met een factor 2 haalbaar.

Uit de inventarisatie van het aanbod aan restwarmte van elektriciteitscentrales volgt dat de ligging gunstig is (aan het water, verspreid door het hele land) en dat de restwarmte vaak niet wordt benut. Anderzijds is het temperatuurniveau van het koelwater relatief laag en is het verloop ongunstig. Dit komt doordat de koelwatertemperatuur de temperatuur van het oppervlaktewater volgt en daarmee met de seizoenen schommelt. Met name in de winterperiode zal directe toe-

passing van koelwater weinig effect sorteren, doordat het koelwater te koud is. Alternatieven zijn dan de inzet van laagwaardige stoom of de optimalisatie van een warmtekrachtcentrale op de warmtebehoefte van het depot.

De warmtevraag is opgesplitst in initiële opwarming, compensatie voor geleidingsverliezen en benodigde warmte voor extra verdamping van vocht. De eerste term is relatief klein. Geleidingsverliezen zijn redelijk in te schatten, de benodigde energie voor extra verdamping is onduidelijk. Hierbij spelen zowel onzekerheden in de vochtbalans (verhouding tussen oppervlakkige afvoer, drainage en verdamping) als in de warmtebalans (wordt de verdampingswarmte onttrokken aan de specie of aan de lucht) een belangrijke rol. Afhankelijk van de mate van opwarming, varieert de totale warmtebehoefte tussen 1,5 GJ/m²,jr (depotoppervlak) bij een constante temperatuur van 15 °C en circa 3 GJ/m²,jr bij een constante temperatuur van 30 °C. Zonder verdamping varieert de warmtebehoefte tussen 0,3 en 1,4 GJ/m²,jr, hetgeen de grote invloed van verdamping (en uiteraard ook van de temperatuur) illustreert.

Fase II: Veldproef

De bespreking van de veldproef richt zich op een vergelijking van de referentie met het vak dat gemiddeld 5 °C in temperatuur was verhoogd. Het vak dat 10 °C in temperatuur was verhoogd, had minder goede resultaten, die vermoedelijk het gevolg zijn van 'verkitting' van de bovenlaag, die daardoor een afdichtende werking kreeg. Het is onzeker of dit het gevolg is van de hogere temperatuur of van (geringe) structuurverschillen tussen de vakken onderling.

In het vak met de matig verhoogde temperatuur verloopt de fysische rijping een factor 1,6 sneller en verschillende chemische rijpingsreacties een factor 1,7 tot 2. Bepalend is in dit geval de afbraak van minerale olie, omdat de normwaarde van het Bouwstoffenbesluit moet worden bereikt. De afbraak van minerale olie verloopt ongeveer een factor 2 sneller. Naast de temperatuurverhoging zelf kan ook de geconstateerde versnelling van de plantengroei bijdragen aan een versnelling van afbraakreacties, via een diepere beworteling. Gunstige effecten van verwarming zijn verder nivellering van verschillen per laag (de rijping verloopt bij verwarming onderin relatief sneller) en vermindering van de hoeveelheid afvalwater.

Uit de vergelijking van de resultaten van de laboratoriumrijpingstest en het verloop van de praktijkrijping blijkt dat de laboratoriumtest een redelijke tot goede voorspelling geeft van de kwaliteit van de gerijpte specie.

Uit de veldproef blijkt dat versnelling van de rijping met een factor 2, en daarmee halvering van de benodigde depotruimte, technisch haalbaar is bij een relatief beperkte verhoging van de temperatuur.

Fase III: Ontwerp van een praktijkdepot en kostenberekening

Er is een modeldepot ontworpen met een capaciteit van 25.000 m³/jaar. Het oppervlak van het verwarmde depot is een factor 2 kleiner dan het onverwarmde. Van beide depots zijn de investerings- en exploitatiekosten berekend. Hierbij zijn de volgende aspecten gevarieerd:

1. Wijze van verwarmen: een traditioneel systeem met buizen in een zandlaag en een systeem met twee lagen folie, opgevuld met zand, waardoor warm water wordt gepompt (hiermee is geen praktijkervaring). De investeringskosten van beide varianten blijken elkaar weinig te ontlopen.

2. De warmtebehoefte is gevarieerd tussen 1 en 2 GJ/m²,jr. Door de relatief kleine schaal van de veldproef, waardoor de randeffecten (warmteverliezen) relatief groot zijn, is voor de warmtebehoefte geen nauwkeurige waarde verkregen.
3. De grondprijs is gevarieerd tussen f 25,- en f 100,- per m².

Voor de diverse varianten geldt dat de verschillen niet groter zijn dan 20 %, waarbij verwarming soms goedkoper is en soms duurder dan het traditionele systeem. Voor de meeste varianten zijn de verschillen gering. De versnelde rijping is maximaal f 5,-/m³ goedkoper dan de traditionele rijping (grondprijs f 100,-/m², laag energieverbruik) en maximaal f 3,50/m³ duurder (grondprijs f 25,-/m², hoog energieverbruik). Geconcludeerd wordt dat verwarming economisch haalbaar is aangezien het kostenniveau vergelijkbaar is met traditionele rijping, terwijl het ruimtebeslag significant kleiner is. Met name in situaties met weinig beschikbare ruimte (hoge grondprijzen) en een goede beschikbaarheid van (rest)warmte (in sommige situaties zou de warmte zelfs om niet kunnen worden verkregen), is verwarming van rijpingsdepots een aantrekkelijke optie.

Samenvattend wordt het volgende geconcludeerd:

1. De rijping van baggerspecie kan met een factor 2 worden versneld. Er zijn geen verschillen in temperatuuroptima van de diverse rijpingsprocessen geconstateerd, hoewel een sterke opwarming wellicht eerder tot uitdroging leidt. Voor de onderzochte specie is de afbraak van minerale olie het limiterende proces voor de verblijftijd. Afhankelijk van het concentratieniveau van minerale olie en het specietype, kan de versnellingsfactor per specietype enigszins variëren.
2. Processturing is mogelijk via beperkte monitoring van met name de zwaveloxidatie en de afbraak van minerale olie. Specifieke maatregelen om uitdroging te voorkomen, zoals omzetting of beregening, waren bij de matige opwarming van de onderzochte specie niet nodig.
3. De versnelling van de rijping met een factor 2 is bereikt bij een temperatuur in de specielaag die gemiddeld 5 °C hoger is dan in de onverwarmde referentie. Door problemen in het vak dat 10 °C in temperatuur was verhoogd, is niet zeker of een toename met 5 °C optimaal is. Het ligt voor de hand dat met name in de winterperiode een grotere opwarming (10 °C) meer effect sorteert. Er moet echter een optimum worden gezocht tussen energieverbruik en versnelling van de rijping. De opwarming met 5 °C kan worden bereikt met water dat een temperatuur heeft van 40 - 50 °C.
4. De specie kan worden verwarmd via een gesloten systeem, waarin water circuleert via buizen of een dubbele laag folie, gevuld met zand. Het water wordt opgewarmd via een warmtewisselaar met behulp van lagedrukstoom, die wordt betrokken van een nabij gelegen elektrische centrale. Overigens zijn ook andere uitvoeringsvarianten en warmtebronnen denkbaar, zoals directe inzet van koelwater en de bouw van een kleine warmtekrachtcentrale, die wordt geoptimaliseerd op de warmtevraag van het depot.
5. De kosten van rijping in een verwarmd depot zijn vergelijkbaar met rijping in een traditioneel depot. In situaties met een grondprijs van f 100,-/m² en lage kosten voor (rest)warmte, is rijping in een verwarmd depot f 5,-/m³ goedkoper dan rijping in een onverwarmd depot.
6. Uit het voorgaande volgt dat rijping van baggerspecie in een verwarmd depot technisch en economisch een haalbare optie is.

SUMMARY

Feasibility study on the ripening and remediation of dredging spoil: enhancing the process using heat

Background and definition of the problem

According to estimates, there is a total quantity of 130 - 150 million m³ of seriously contaminated (class 3 and 4) dredging spoil present in the Netherlands. It is the declared aim of the national government to find a useful application for at least 20 % of this material. Sand separation and ripening are the most important - and relatively least expensive - techniques to make materials fit for such an application. Ripening is suitable for rather clayish (and peaty) spoil, which is not strongly contaminated. The process of ripening allows for the degradation of organic contaminants, to the effect that the final product of the ripening process will most likely be fit for use as a building material, provided that the contaminant concentration of the material originally fed into the process did not exceed the relevant limit values imposed by the Building Materials Decree (*Bouwstoffenbesluit*) by a factor > 2 - 3 for common organic pollutants.

One of the disadvantages of the ripening process lies in the fact that it takes up a lot of space. Ripening occurs in depots, in which layers of about 1 m thickness are stored for 1 to 2 years. Large-scale application of this technique may therefore easily result in lack of space. To counteract this, an investigation was made into possible ways of shortening the time required for full ripening. One option is to increase the temperature of the dredging spoil, thus accelerating the physical, chemical and biological process steps involved. This idea was developed in view of *RWS Limburg's* intention to process dredging spoil originating from the river Meuse at a location near the *Clauscentrale*-facility of the power company *Elektriciteits Productiemaatschappij Zuid-Nederland (EPZ)*. It was assumed that it might be possible to accelerate the ripening process using residual heat from the power station. Therefore, a consortium was formed within the framework of *NOBIS*. Consortium partners include the *Limburg* Directorate and the Road and Hydraulic Engineering Division of the Department of Waterways and Public Works (*Rijkswaterstaat Directie Limburg* and *Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde*), the power company *EPZ*, *Alterra* and *Tauw bv*. The stated aim of the cooperation was to investigate the feasibility of using power generation (residual) heat to accelerate the ripening process of the dredging spoil.

Objectives

The technical and economic feasibility of using heat to accelerate the ripening process of dredging spoil can be established if the following sub-objectives are met:

1. establish the degree to which the various ripening processes can be accelerated, determine possible differences in optimum temperatures for the different processes and identify the factors that are decisive for the duration of the process, so that it can be determined to what extent the overall process can be shortened;
2. determine if and how the process can be controlled so that (i) the residence period can be optimized and (ii) possible adverse side-effects of the heating, such as dehydration, can be prevented;
3. establish the optimum depot temperature and the temperature (or amount) required for the heat to be fed into the process;
4. determine the optimum technique to be followed in heating the dredging spoil;
5. calculate the economic feasibility by making a cost-benefit analysis.

Investigation phases and strategy

The investigation was performed in three phases:

Phase I: Laboratory testing and heat estimates.

Phase II: Field testing.

Phase III: Design of a large-scale depot and cost estimate.

In the course of Phase I, the following works were performed:

- a. concise review of existing data and possible problems;
- b. selection of the materials to be tested: all tests were performed using dredging spoil originating from the river Meuse near *Belfeld* (sluice complex);
- c. establish the availability of residual heat from power stations (location, quantities, temperature levels);
- d. laboratory testing to establish the effects of heating on the physical and chemical ripening at various temperatures, in order to gain insight into the maximum effects possible on the various ripening processes and to establish the optimum temperature;
- e. establish certain key figures with regard to the dredging spoil, particularly the heating capacity and heat conductivity;
- f. calculating the heat demand for the entire duration of a ripening cycle.

The strategy of Phase II was to investigate the effects of heating the spoil on a semi-practical scale. To this end, there were three 2 m³ depots built in the open air. The temperatures applied to these depots were as follows:

1. reference situation: unheated;
2. moderately increased temperature: temperature an average 5 °C higher than the spoil temperature in the reference situation;
3. increased temperature: temperature an average 10 °C higher than the spoil temperature in the reference situation.

The ripening process was closely monitored - by periodic inspections, sampling and chemical analysis rounds - in all three depots for the duration of 9 months. This made it possible to establish the effects of the temperature increase on the course of processes such as dewatering, sulphur oxidation and mineral oil degradation. Also, a comparison was made with the results of an enhanced ripening test conducted in the laboratory.

In Phase III at last, the field testing results served as a basis for the design of a practice-scale depot with and without spoil heating facilities. At an identical depot capacity, the heated facility requires less space, which results in considerable savings in the cost of land use. The overall costs are further cut by the smaller quantity of wastewater and the somewhat smaller quantity of final product resulting from the process. On the other hand, investments are necessary into the heating system, and the required heat must be bought and transported to the site, entailing costs as well. The economic feasibility of heating the dredging spoil was assessed on the basis of this analysis.

Results

Phase I: Laboratory testing and heat estimates

An increase in temperature accelerates the physical ripening (drying), the macrochemical conversion and the degradation of organic microcontaminants. Remarkably, it was found that the zinc, which is mobilized in the process of ripening, tends to be bound (more easily) at higher temperatures. At 30 °C, the various chemical and biological reactions progress a factor 2 to 4 quicker than at a temperature of 10 °C (slurry system). If water of 40 °C is used to heat the material from the bottom, the physical ripening process was found to progress a factor 1.6 faster than at room

temperature. The results of the laboratory testing indicate that it would be feasible in practice to accelerate the ripening process by a factor 2.

The inventory made of the residual heat available from power stations showed that the siting of such stations is favourable (on the waterfront, scattered throughout the country) and that often, no use is made of the residual heat produced. On the other hand, the temperature of the cooling water tends to be relatively low, and developments in temperature are rather unfavourable, given that the highest levels are reached in summer (approximately 30 °C). Of course, the temperature of the cooling water follows that of the surface water. Particularly in wintertime, the direct application of cooling water will show little effect. It may be an alternative to use low pressure steam or to modify the output of a combined heat and power station so as to make it meet the heat demand of the depot.

The heat demand is split up into initial heating, compensation for losses due to conductivity and heat required for an extra evaporation of moisture. The demand due to initial heating is relatively low. Losses due to conductivity can be estimated quite well, whereas the energy demand for extra evaporation is unclear. Factors of importance to the latter are the moisture balance (relation between surface discharge/run-off, drainage and evaporation) and the heat balance (is the evaporation heat extracted from the dredging spoil or from the air). Depending on the intensity of heating, the total heat demand ranges from 1.5 GJ/m²,yr (depot surface) at a constant temperature of 15 °C to approximately 3 GJ/m²,yr at a constant temperature of 30 °C. Without evaporation, the heat demand ranges from 0.3 to 1.4 GJ/m²,yr, which illustrates the major impact of evaporation (and, of course, temperature).

Phase II: Field testing

The discussion of the field testing concentrates on a comparison between the reference situation and the situation in a compartment in which the average temperature was elevated by 5 °C. The compartment in which the temperature was raised by 10 °C showed less promising results. This is probably due to the top layer having formed a rather solid mass, to the effect that it practically assumed the quality of a seal. It is not known if this was caused by the higher temperatures or by (insignificant) differences in structure between the various compartments.

As for the compartment with the moderately elevated temperature it was found that the physical ripening was accelerated by a factor 1.6, and the various chemical ripening reactions by a factor 1.7 to 2. In the case before us, the degradation of mineral oil was crucial, given that the respective limit value stipulated in the Building Materials Decree (*Bouwstoffenbesluit*) must be complied with. Mineral oil was found to be degraded a factor 2 faster. Apart from the increase in temperature, the enhanced growth of plants established in this trial may also help to accelerate the degradation process, through the forming of roots reaching deeper into the soil. Other positive side effects of the heating were the levelling out of differences within the individual layers (relatively speaking, the ripening enhanced by heating will occur faster at the bottom), and a decrease in the quantity of waste water produced.

The comparison between the results of the laboratory ripening test and the progress made in the practical trial shows that the laboratory test allows for a good to reasonable prediction of the quality the dredging spoil will have at the end of the ripening process.

The field test shows that it is technically feasible to use a limited increase in temperature to accelerate the ripening process by a factor 2, while cutting into half the depot space required for the spoil.

Phase III: Design of a large-scale depot and cost estimate

There was a model depot designed of a capacity of 25,000 m³/year. The surface area of the heated depot is a factor 2 smaller than that of the unheated depot. The following aspects were varied:

1. It was assumed that the heating would be done using either of two systems, a traditional one working with heating pipes and a sand layer, and another one using two layers of foil filled up with sand, through which warm water is being pumped (no practical experience has been gathered with the latter system). Investments appear to be about the same for both systems.
2. The heat demand was assumed to range from 1 to 2 GJ/m²,yr. It was not possible to arrive at an exact figure for the heat demand, given that the scale of the field test was relatively small, so that the side effects (heat losses) appear relatively important.
3. With regard to the cost of land, a range of Dfl 25.- to 100.- was assumed per m².

The difference between the various options calculated never exceeded 20 %. At times, the option providing for heating was cheaper than the conventional variant, while at others, it was more expensive. However, in most cases the differences were small. At most, enhanced ripening is Dfl 5.-/m³ cheaper or Dfl 3.50/m³ more expensive than conventional ripening. It may be concluded that the heating is economically feasible, given the fact that the overall costs are comparable to those of the traditional ripening process, while substantially less space is required. Particularly in situations in which the space available is limited (high land costs) while at the same time there is (residual) heat available (at times even free of charge), it is an attractive option to heat the ripening depots for dredging spoil.

In summarizing the above, the following conclusions can be drawn:

1. The ripening of dredging spoil can be accelerated by a factor 2. There were no differences found in the optimum temperatures for the various ripening processes, although intensive heating may entail dehydration more easily. In the case of the dredging spoil under investigation, the degradation of mineral oil was found to be the most decisive factor for the residence time. Depending on the concentration level of mineral oil and the type of spoil concerned, the acceleration rate may show some variation from one type of spoil to another.
2. Process control is possible through limited monitoring, particularly of sulphur oxidation and mineral oil degradation. With the spoil under investigation being heated to a moderate degree only, it proved unnecessary to take specific measures (such as restacking the spoil or sprinkling it) in order to counteract dehydration.
3. The acceleration by a factor 2 of the ripening process was achieved at a spoil layer temperature that was an average 5 °C higher than that of the unheated reference spoil. Due to the problems that occurred in the compartment in which the temperature was increased by 10 °C, it is not sure that an increase by 5 °C is the optimum. It would appear logic that particularly in wintertime, a more intensive heating (increase by 10 °C) would show more effect. The point is, however, that an optimum relation must be found between energy consumption on the one hand and enhancement of the ripening process on the other. The temperature increase by 5 °C can be reached using water of a temperature range from 40 to 50 °C;
4. The dredging spoil can be heated using a closed system, in which water circulates through pipes or through a double layer of foil filled with sand. The water is heated by a heat exchanger using low pressure steam supplied by a nearby power station. It is, of course, possible to work with other implementation options and energy sources as well.
5. The costs of spoil ripening in a heated depot are comparable to those of ripening in a conventional depot. In situations involving high land prices and low (residual) heat charges, the heated process will be less expensive than the conventional process.
6. It may be concluded for the above that the ripening of dredging spoil in a heated depot is a technically and economically feasible option.

HOOFDSTUK 1

INLEIDING

1.1 Achtergrond

De problematiek van verontreinigde baggerspecie is de laatste jaren in beeld gebracht. Schattingen geven aan dat 130 - 150 miljoen m³ specie ernstig vervuild is (klasse 3 en 4). Het merendeel hiervan betreft specie uit de Rijkswateren, circa 75 miljoen m³. Een deel van deze specie zal vanwege onderhoud hoe dan ook vrijkomen. De verontreinigingen in baggerspecie zijn zeer divers. In de meeste gevallen is er sprake van een combinatie van componenten. Veel voorkomende verontreinigingen zijn PAK, zware metalen, minerale olie en PCB's. De combinatie van organische verontreinigingen en zware metalen bemoeilijken de verwerking.

Ten aanzien van baggerspecie is als doel gesteld 20 % hergebruik van klasse 2, 3 en 4. Om dit doel te bereiken staan een aantal technieken ter beschikking. De belangrijkste zijn zandscheiding en rijping. Zandscheiding met behulp van bijvoorbeeld sedimentatiebekkens is een effectieve en snelle manier om zandrijke verontreinigde specie geschikt te maken voor hergebruik. Voor meer kleiige specie biedt rijping een goede uitkomst. Rijping van specie, die niet te zeer is verontreinigd, leidt tot materiaal dat geschikt is voor hergebruik. Rijping kan een significante bijdrage leveren aan de hergebruiksdoelstelling.

Een nadeel van rijping is het ruimtebeslag. Rijping vindt plaats in depots, waarbij de laagdikte ongeveer één meter is. De benodigde tijd voor rijping bedraagt 1 - 2 jaar. Gedurende minstens een heel jaar is een depot derhalve bezet voor één partij baggerspecie. Er wordt een gebrek aan ruimte verwacht, wanneer rijping breed zal worden ingezet teneinde hergebruik te realiseren. Dit feit is aanleiding geweest om te kijken naar opties om de behandelingstijd van rijping te verkorten. Een concrete oplossing bood zich aan in Limburg, waar de Directie Limburg van Rijkswaterstaat de mogelijkheden voor opslag in de Molengreend onderzoekt. Dit terrein bij de energiecentrale van EPZ biedt mogelijkheden voor bewerking van baggerspecie. Het idee is ontstaan om te onderzoeken of restwarmte van de centrale kan worden ingezet om de rijping van specie te versnellen. Op laboratoriumschaal was reeds goede ervaring opgedaan met het versnellen van rijping door verhoging van de temperatuur.

In samenwerking met Rijkswaterstaat (Directie Limburg en Dienst Weg- en Waterbouwkunde, DWW), Elektriciteits Productiemaatschappij Zuid-Nederland (EPZ) en Alterra is door Tauw bv een voorstel uitgewerkt om de mogelijkheden na te gaan om op grote schaal gebruik te maken van (rest)warmte bij de rijping van baggerspecie. Wanneer het gebruik van (rest)warmte kan leiden tot een versnelling van de rijping, en dus tot een efficiënter gebruik van de ruimte (bijvoorbeeld twee cycli van rijping per jaar in plaats van één), zal grootschalig hergebruik van baggerspecie gemakkelijker verwezenlijkt kunnen worden.

Onderhavig project is bij NOBIS ingediend door een consortium bestaande uit de genoemde bedrijven en instellingen. Het project wordt naast NOBIS gefinancierd door een inbreng van Rijkswaterstaat (Directie Limburg en DWW). Penvoerder van het project is Tauw bv.

1.2 Concept van het proces

Het concept van het proces is om door middel van temperatuurverhoging de rijpingsprocessen te versnellen. Dit geldt zowel voor de fysische processen (droging door verdamping) als chemische en microbiologische processen. Het resultaat is een grotere verwerkingscapaciteit en mogelijk tevens een betere eindkwaliteit.

Voor de economische haalbaarheid is het essentieel dat de kosten van de benodigde energie laag zijn. Daarom wordt uitgegaan van de inzet van restwarmte die vrijkomt bij elektriciteitscentrales of andere bedrijven, de inzet van goedkoop beschikbare LD-stoom of het optimaliseren van een kleine warmtekrachtcentrale op warmtelevering aan het depot. Dit concept biedt grote mogelijkheden. Enerzijds is er de verwachting dat hiermee tegen relatief lage kosten de verwerkingscapaciteit van rijpingsdepots kan worden vergroot, waarbij tevens milieuvoordeel wordt bereikt. Het milieuvoordeel bestaat uit de nuttige toepassing van restwarmte, de productie van nuttig toepasbare bouwstoffen en daardoor besparing van het verbruik van primaire bouwstoffen. Verder is de infrastructuur bij elektriciteitsproducenten zeer gunstig (ligging aan water, beschikbare ruimte).

1.3 Doelstellingen

Het doel van het onderzoek is het vaststellen van de technische en economische haalbaarheid van en de optimale werkwijze bij de behandeling van baggerspecie in depot met de inzet van (rest)warmte. De behandeling richt zich zowel op specie die verontreinigd is met organische verontreinigingen (met name PAK en minerale olie) als op specie die verontreinigd is met zware metalen en combinaties hiervan. Meer specifiek moeten de volgende subdoelstellingen worden bereikt:

1. bepalen van de mate waarin de verschillende rijpingsprocessen kunnen worden versneld, eventuele verschillen in temperaturoptima van de diverse processen en het identificeren van het limiterende proces voor de duur van de rijping, zodat de overall verkorting van de rijpingduur kan worden vastgesteld;
2. vaststellen of en hoe het proces moet worden gestuurd om (i) de verblijftijd te optimaliseren en (ii) eventuele negatieve bij-effecten van verwarming, zoals uitdroging, te voorkomen;
3. bepalen van de optimale depottemperatuur en het vereiste niveau van de temperatuur (of de warmte-inhoud) van de toe te voeren (rest)warmte;
4. bepalen van de optimale wijze waarop de specie kan worden verwarmd (uitvoeringstechniek);
5. berekenen van de economische haalbaarheid door middel van een kosten-batenanalyse.

1.4 Opbouw van de rapportage

In hoofdstuk 2 van dit rapport is een beschrijving opgenomen van de bestaande kennis inzake de rijping van baggerspecie alsmede de ontbrekende kennis inzake de versnelde rijping onder invloed van een verhoogde temperatuur. Met dit inzicht is vervolgens de opzet van het onderzoek geformuleerd (zie hoofdstuk 3). In hoofdstuk 4 komen het laboratoriumonderzoek en de hierbij verkregen resultaten aan de orde. De warmteberekeningen in hoofdstuk 5 zijn deels gebaseerd op de bevindingen van het laboratoriumonderzoek.

De veldproef, zoals beschreven in hoofdstuk 6, is een eerste stap op weg naar de toepassing van versnelde rijping van baggerspecie in de praktijk. In hoofdstuk 7 worden vervolgens uitspraken gedaan of de praktijktoepassing van het principe van versnelde rijping haalbaar is op grond van technische en economische overwegingen.

Het onderzoek wordt afgerond met een discussie (zie hoofdstuk 8) en de conclusies die uit het onderzoek kunnen worden getrokken (zie hoofdstuk 9).

HOOFDSTUK 2

BESTAANDE KENNIS EN KNELPUNTEN

In dit hoofdstuk zal de bestaande kennis op het gebied van het rijpen van baggerspecie worden geïnventariseerd. Vervolgens zal worden ingegaan op de kennis omtrent het gebruik van warmte bij het reinigen van grond en de verwijdering van zware metalen uit grond door middel van biologische processen. Hierbij zal duidelijk worden welke kennis ontbreekt inzake de praktijktoepassing van versnelde rijping van baggerspecie onder invloed van warmte. Met de verkregen inzichten worden vervolgens de aandachtsvelden voor het onderzoek geformuleerd.

2.1 Samenvatting van bestaande kennis over het rijpingsproces van baggerspecie

2.1.1 *Rijpingsproces*

Baggerspecie is met water verzadigd en heeft veelal een gereduceerd karakter omdat het uit een anaëroob (zuurstofloos) milieu komt. Wanneer het in een rijpingsdepot wordt gebracht, zal de specie ontwateren en langzamerhand een geoxideerd (aëroob) karakter krijgen. Hierbij treden een groot aantal processen op, die in drie groepen worden onderverdeeld:

1. fysische rijping: ontwatering en structuurverbetering;
2. chemische rijping: oxidatieprocessen en volgreacties als ontkalking en ionenwisseling;
3. microbiologische rijping: ontwikkeling van een nieuwe microflora, die kan resulteren in afbraak van organische microverontreinigingen en organische stof en (versnelde) oxidatie van sulfiden.

De verschillende reacties zijn onderling verweven, maar het is duidelijk dat de specie eerst in zekere mate ontwaterd moet zijn alvorens de chemische en microbiologische rijping op gang kan komen.

Rijping is een vanouds veel toegepast proces. Voorheen werd baggerspecie veelal op de kant gezet om het te laten rijpen. Hierbij werd veel praktische kennis opgedaan, met name gericht op het snel en efficiënt ontwateren. Door PHB is deze 'oude' rijpingskennis onlangs in beeld gebracht [1]. Met betrekking tot het versnellen van het rijpingsproces en het procesmatig verwerken in depots is weinig ervaring opgedaan. Door Tauw wordt gewerkt aan een test om de kwaliteit van specie na rijping te voorspellen. Hierbij wordt met name gekeken naar methoden om de rijping te versnellen [2, 3].

2.1.2 *Veranderingen in de macrosamenstelling*

Veranderingen in de macrosamenstelling zijn vooral een gevolg van chemische rijping. Directe uitspoeling van componenten als chloride, die onafhankelijk is van omzettingen, heeft een relatie met de fysische rijping. Veranderingen in de macrosamenstelling kunnen betrekking hebben op het totaalgehalte en/of de speciatie, dat wil zeggen de chemische vorm(en) waarin een element aanwezig is.

Organische stof

Organische stof wordt onder aërobe condities verder gemineraliseerd dan onder anaërobe omstandigheden. In principe zal het gehalte aan organische stof daarom dalen. De mate waarin dit gebeurt is afhankelijk van de leeftijd van het organisch materiaal (hoe jonger, hoe beter afbreekbaar) en de duur van het rijpingsproces. Uit de gegevens die tot nu toe ter beschikking staan, blijkt dat de afbraak gedurende 1 jaar rijping meestal nihil tot gering is. Dit wijst erop dat deze organische stof 'oud' (d.w.z. redelijk gestabiliseerd) is. In situaties waarin verse organische stof aanwezig is of bij een rijpingsduur van meerdere jaren, is een verdergaande afbraak mogelijk.

Zwavel

Het grootste deel van de zwavel in baggerspecie is in de gereduceerde (sulfide)vorm aanwezig. Afhankelijk van het type sulfide, wordt dit tijdens de rijping snel of langzaam omgezet in sulfaat. Uit laboratoriummetingen blijkt dat 50 - 80 % van het totaal-zwavel kan worden geoxideerd. De omzetting in de praktijk is afhankelijk van de snelheid van het rijpingsproces, maar is zodanig dat er een forse overschrijding ontstaat van de categorie 1 waarde van het Bouwstoffenbesluit [4] voor sulfaat. Het totale zwavelgehalte zal bij een rijpingsperiode van 1 jaar waarschijnlijk maar weinig veranderen (zie opmerking bij 'zouten'), daarentegen verandert de chemische vorm van het zwavel (de speciatie) sterk.

Kalk, pH

Bij oxidatie van zwavel en organische stof ontstaat zuur, hetgeen reageert met kalk (CaCO_3). Het kalkgehalte zal daarom afnemen. In het algemeen is het kalkgehalte in Nederlandse kleiige specie zodanig hoog dat dit ruim voldoende is om alle zuur te bufferen. Er zijn wel enkele voorbeelden bekend van verzuring van een venige specie [5] en van ingepolderde gronden. Verzuuring resulteert in mobilisatie van zware metalen en heeft daarom een negatief effect op de speciekwaliteit.

Zouten

Zouten als NaCl, KCl, MgCl_2 , Br en F zullen gedeeltelijk uitspoelen met het ingebrachte transport- en poriewater en verder door percolerend regenwater. Omdat met name Cl en Br zeer goed oplosbaar zijn, zullen de gehalten van deze componenten relatief snel dalen. Een volledige uitspoeling zal echter niet binnen 1 jaar optreden. Sulfaat kan eveneens uitspoelen maar omdat dit gedurende de rijping nieuw wordt gevormd en omdat de oplosbaarheid kleiner is, zal de uitspoeling beperkt zijn.

Stikstof

Ammoniumstikstof wordt tijdens de rijping omgezet in nitraat. Dit geldt in mindere mate ook voor organisch gebonden stikstof, dat vrijkomt bij afbraak van organisch materiaal. Omdat de specie aanvankelijk nog deels zuurstofloos is, zal het gevormde nitraat ten minste voor een deel worden gedenitrificeerd, waardoor het totale stikstofgehalte enigermate zal afnemen.

IJzer en mangaan

Tijdens de rijping worden ijzer en mangaan geoxideerd, waardoor de oplosbaarheid afneemt. De totaalgehalten zullen gelijkblijven. Uit onderzoek blijkt dat ijzer conform de verwachting snel wordt geoxideerd en uit de (uitloog)oplossingen verdwijnt. Het gedrag van mangaan is minder eenduidig.

Redoxpotentiaal

De redoxpotentiaal neemt toe als gevolg van de verschillende oxidatiereacties.

Uit het voorgaande blijkt dat het verloop van de chemische rijping is te volgen door één of enkele '*rijpingsindicatoren*' of '*gidsparameters*' regelmatig te meten. In [3] wordt geconcludeerd dat de zwaveloxidatie (i.c. het verloop van de sulfaatconcentratie) de beste indicator is en dat daarnaast het verloop van ammonium, ijzer, mangaan en de redoxpotentiaal nuttige informatie kan opleveren. In [5] wordt gekozen voor de redoxpotentiaal, pH en het rijpingsgetal als gidsparameters.

2.1.3 *Uitvoering en snelheid van het rijpingsproces*

Min of meer standaard wordt specie in een laagdikte van 1 m in gedraineerde depots aangebracht. Deze specie is na 1 jaar in de regel fysisch voldoende gerijpt, zodat het depot kan worden ontgraven. Dit geldt zeker voor zandige specie, maar bij sterk venige of kleiige specie is 1 jaar niet altijd voldoende. Ook bij een voldoende fysische rijping zullen de chemische en microbiologische rijpingsprocessen na 1 jaar in de regel nog niet volledig zijn verlopen, tenzij er sprake is van een zeer zandige specie.

De snelheid van de rijpingsprocessen is van meerdere factoren afhankelijk. Genoemd worden:

1. Inrichting van het depot (doorlatendheid onderlaag, wel/geen drainage).
2. Beheer van het depot (laagdikte specie, begreppeling enz.).
3. Weersgesteldheid, met name de nettoverdamping.
4. Type baggerspecie: zandig, kleiig, venig. Zandige specie ontwatert aanzienlijk sneller dan kleiige en venige specie.

Uit monitoring van rijpingsdepots is bekend dat de rijping hoofdzakelijk plaatsvindt in de zomerperiode [5]. In de winter is niet alleen de temperatuur lager, maar is er ook sprake van een neerslagoverschot (neerslag is groter dan verdamping), waardoor zowel de fysische als de chemische/microbiologische rijping vrijwel tot stilstand komen.

2.1.4 *Milieuhygiënische kwaliteit van baggerspecie en veranderingen gedurende rijping*

Volgens het Bouwstoffenbesluit wordt gerijpte baggerspecie beschouwd als grond. Hiervoor gelden zowel samenstellings- als uitloognormen. Baggerspecie is veelal in meerdere of mindere mate verontreinigd met zware metalen, organische microverontreinigingen (minerale olie, PAK's, soms ook PCB's, bestrijdingsmiddelen e.a.), zouten (Cl, Br, F en SO₄) en cyaniden.

Gedurende de rijping zal het gehalte aan metalen vrijwel constant blijven. Gehalten aan hogere PAK's (5/6 ringen), PCB's en andere persistente stoffen zullen eveneens weinig afnemen bij een beperkte rijpingsduur (soms kan de afbraak worden gestimuleerd door bepaalde maatregelen te treffen). Wanneer dergelijke stoffen de samenstellingsnormen overschrijden, is de gerijpte specie niet toepasbaar.

Minerale olie en lagere PAK's (2/3 ringen, in mindere mate 4 ringen) zijn wel afbreekbaar, hoewel de rendementen in de praktijk aanzienlijk variëren. Voor minerale olie varieert de afbraak tussen 0 en 70 %, voor lagere PAK's tussen 0 en 40 % (zonder bewerking van de specie). Cyanide is biologisch afbreekbaar maar uit de gegevens, die tot nu toe beschikbaar zijn, blijkt hier weinig van. Cyanide kan in theorie ook uitspoelen.

Met name brakke en zoute species bevatten veel Cl, Br en F, hetgeen tijdens de rijping deels zal uitspoelen. Zoals is behandeld in 2.1.2, zal het sulfaatgehalte toenemen.

Voor de uitloging van metalen geldt dat deze theoretisch sterk kan toenemen als gevolg van sulfide-oxidatie. Tot nu toe zijn er geen aanwijzingen dat dit vaak gebeurt. In het algemeen voldoen de uitloogemissies van metalen aan categorie 1 waarden, incidenteel zijn echter overschrijdingen mogelijk. Bij verzuring van de specie zullen wel problemen ontstaan met de uitloogemissies.

Uit een inventarisatie van praktijkgegevens [6] blijkt dat er twee categorieën van baggerspecie zijn te onderscheiden, waarbij intensivering van de rijping zinvol is uit oogpunt van kwaliteitsverbetering:

1. Specie die wel toepasbaar is op basis van de gehalten aan anorganische componenten (metalen) maar niet op basis van het gehalte aan minerale olie. In verband met de relatief strenge eis voor minerale olie (grenswaarde voor toepassing als bouwstof is 500 mg/kg ds, interventiewaarde is minimaal 1000 mg/kg ds) blijken veel partijen baggerspecie niet toepasbaar. Voor deze categorie geldt dus dat de afbraak van minerale olie moet worden versneld. Andere componenten, zoals PAK, blijken in deze categorie slechts incidenteel kritisch te zijn in de zin dat niet wordt voldaan aan de samenstellingseisen van het Bouwstoffenbesluit.
2. Specie die niet toepasbaar is op basis van gehalten van zowel metalen als van organische componenten. In deze categorie zijn, naast metalen, minerale olie, PAK en soms ook PCB's kritische parameters. Afhankelijk van de aard en de gehalten van de verontreinigingen, kan versnelling van de afbraak zinvol zijn, mits tegelijk een deel van de zware metalen kan worden uitgespoeld.

Afgezien van een betere eindkwaliteit, is versnelling van de rijping altijd zinvol uit het oogpunt van de depotcapaciteit. Dit geldt ook in situaties dat de milieuhygiënische kwaliteit al voldoet of dat duidelijk is dat de specie niet toepasbaar is. Voor deze laatste categorie geldt dat rijping zinvol is omdat het volume met een orde van grootte van 50 % afneemt, zodat veel minder materiaal hoeft te worden gestort.

2.1.5 *Afbraak van organische verontreinigingen*

Afbraak van minerale olie en PAK's in rijpende baggerspecie is goed gedocumenteerd [5]. Uit monitoring blijkt de afbraak van minerale olie na 1 jaar rijping te variëren tussen 0 en 70 %. Meestal worden waarden van 40 - 50 % gemeten. Voor één partij is vastgesteld dat omploegen en inzaaien met tarwe in een toename van het rendement resulteert met 15 % (van 46 naar 61 %).

Voor PAK (totaal 10 VROM) varieert de afbraak na 1 jaar rijping tussen 0 en 35 %. Voor één partij, die in een dunne laag van 20 cm is aangebracht, is een afbraakpercentage van 68 % gevonden, terwijl bewerking van die partij (omploegen en inzaaien met tarwe) in een verdere toename tot 80 % resulteert. Voor een andere partij (laagdikte bij aanvang 1 m) geldt een afbraak van 40 % met bewerking (regelmatig omploegen en inzaaien met rogge), zonder bewerking is de afbraak 20 %.

De aanzienlijke variaties in de afbraakrendementen hebben meerdere oorzaken:

1. Voor minerale olie geldt dat de afbraak hoger is naarmate het begingehalte hoger is. Voor PAK is deze tendens in minder sterke mate ook aanwezig.
2. De afbraak van PAK is afhankelijk van de chemische speciatie, omdat lagere PAK (2/3 en 4 ringen) beter afbreekbaar zijn dan hogere. Uit de verschillende onderzoeken blijken rendementen tussen 0 en 90 % voor 2/3 ringen, tussen 0 en 70 % voor 4 ringen en tussen 0 en 30 % voor 5/6 ringen. Wanneer het aandeel lagere PAK's groter is, zal het afbraakrendement dus toenemen.
3. De afbraak zal ook afhankelijk zijn van de fysische speciatie, zoals de aanwezigheid van deeltjes, de sterkte van de sorptie enzovoorts. Uit [5] blijkt echter geen duidelijk verband tussen specietype (klei, zand, veen) en afbraakrendement.
4. Zoals is besproken, resulteren bewerkingen, verkleining van de laagdikte en ook verlenging van de verblijftijd in hogere rendementen. Dit betekent dat de beschikbaarheid van de verontreiniging en/of de zuurstoftoevoer limiterend zijn voor de afbraak.

5. De nieuwvorming van verontreinigingen kan ook een rol spelen, zoals de vorming van lagere PAK uit hogere (die niet worden gemeten), waardoor de gehalten (tijdelijk) kunnen toenemen.

Uit de verschillende meetreeksen blijkt dat de afbraak met name in de zomerperiode plaatsvindt. Verhoging van de temperatuur in de hele rijpingsperiode zal daarom een positief effect hebben. Dit effect is momenteel niet te kwantificeren. Uit laboratoriumproeven blijkt weliswaar dat 1 jaar rijping in 2 tot 8 weken is te simuleren, maar hierbij zullen verschillende factoren een rol spelen. Naast de toegepaste verhoging van de temperatuur tot 35 °C zullen menging of een geringe laagdikte ook effecten hebben, omdat hierdoor de beschikbaarheid van de verontreiniging en van zuurstof beter zijn dan in de praktijk. Wel bevestigen de laboratoriumproeven dat met name minerale olie goed afbreekbaar is; in slurryproeven worden rendementen van 80 tot 90 % gevonden [2, 3].

2.2 Verwijdering van zware metalen

De mogelijkheden om zware metalen via biologische processen te verwijderen ('bioleaching'), zijn eerder uitgebreid geëvalueerd [7]. In dit kader wordt een samenvatting gegeven, die is toegespitst op baggerspecie.

Zware metalen gaan in oplossing bij lage pH-waarden en kunnen vervolgens worden uitgespoeld. Verzuring van ingepolderde gronden treedt in de tropen op grote schaal op ('katteklei'), in Nederland gebeurt dit incidenteel. De reden hiervoor is dat Nederlandse sedimenten in de regel voldoende gebufferd zijn. De belangrijkste zuurvormende reactie is de oxidatie van pyriet en dit proces treedt ook op in rijpende baggerspecie, echter het kalkgehalte is voldoende om het geproduceerde zuur te neutraliseren. In de recente literatuur is een voorbeeld van spontane verzuring van venige specie [5]. Deze verzuring gaat gepaard met de mobilisatie van zware metalen.

Tijdens de rijping is in de bovenlaag een minimale pH van gemiddeld 5,1 bereikt, met een uitschieter in een deelmonster van 4,0. Door de rijping voldoende lang voort te zetten en de condities te optimaliseren, lijken pH-waarden van 3 - 4 in deze situatie haalbaar. Uit dit onderzoek en uit diverse laboratoriumonderzoeken [2, 3] blijkt duidelijk dat sulfide-oxidatie spontaan op gang komt en dat een groot deel van het initieel aanwezige sulfide (tot een maximum van 80 %) wordt geoxideerd. In verband met de buffercapaciteit van kleiige specie zal bij het vullen van de depots extra zwavel moeten worden toegevoegd om voldoende zuur te produceren.

Op dit moment is het onduidelijk of de zuurstoftoevoer problemen kan opleveren (limitatie is gezien de beperkte doorlatendheid van baggerspecie denkbaar). Om dit te ondervangen zijn maatregelen nodig, zoals het omzetten van het depot of gerichte zuurproductie in de toplaag, gevolgd door percolatie van het zuur. In elk geval zullen de gemobiliseerde metalen moeten worden uitgespoeld en via het drainagesysteem moeten worden verwijderd. Hoewel dit resulteert in een verlenging van de rijpingsduur, wordt het mogelijk geacht om de operatie binnen 0,5 jaar te voltooien. 'Heap leaching' van ertsdepots (met een hoogte die veelal aanzienlijk meer is dan 1 m in een baggerspeciedepot) neemt veelal enkele maanden in beslag.

Verder geldt dat het spoelen van de baggerspecie ook zinvol is uit het oogpunt van verwijdering van zouten. Voor het merendeel van de partijen gerijpte specie geldt dat de categorie 1 eis voor sulfaat in sterke mate wordt overschreden, hetgeen de afzet sterk bemoeilijkt. Voor brak- en zoutwaterspecies gelden verder overschrijdingen voor chloride, bromide en fluoride. Deze zouten kunnen gecombineerd met het gevormde sulfaat en de gemobiliseerde metalen worden uitgespoeld.

Verhoogde temperaturen zijn bij de huidige toepassingen van 'bioleaching' eerder regel dan uitzondering. Dit komt door het exotherme karakter van de reacties, waardoor de temperatuur in de

depots spontaan toeneemt. Soms is een vorm van koeling nodig om te voorkomen dat de temperatuur te hoog oploopt, waardoor de zwaveloxiderende micro-organismen zouden afsterven. Het temperatuuroptimum voor de groei van *Thiobacilli* varieert per soort. De optima van veel acidofiele soorten ligt in de range van 25 - 35 °C, zodat een temperatuur van 30 °C het meest gunstig is. Dit zal echter voor baggerspecie experimenteel moeten worden vastgesteld.

Het is bekend dat de oplosbaarheid van metalen in verschillende mate toeneemt bij verlaging van de pH. De metalen zink en cadmium, die kritisch zijn in de te onderzoeken specie, gaan relatief makkelijk in oplossing [7, 8].

2.3 Effecten van warmte

Er zijn verschillende praktijkvoorbeelden van de toepassing van warmte bij landfarming en in situ sanering. Qua uitvoering zijn de volgende technieken te onderscheiden:

1. landfarming in kassen (Cum Bac systeem Arcadis);
2. landfarming in hallen, waarbij de grond wordt verwarmd met warm water of warme lucht (Heijmans, Bion, Bouw- en Reststoffen Friesland - praktijkproef waarbij restwarmte wordt gebruikt van een stortgasinstallatie);
3. landfarming met additie van organisch materiaal, bij de compostering van het organisch materiaal komt warmte vrij;
4. in situ sanering met stoominjectie;
5. in situ sanering met gebruik van diëlektrische verwarming door micro- of radiogolven (praktijkvoorbeelden in de USA);
6. in situ sanering waarbij de grond wordt verwarmd met elektrische stroom, die via elektroden in de grond wordt ingebracht (elektroreclamatie, zie voor praktijkvoorbeelden [9] en [10]).

Voor de technieken 4, 5 en 6 geldt dat deze met name of volledig zijn gericht op het uitdrijven van vluchtige stoffen uit de bodem. De temperatuur waarbij wordt gewerkt varieert van 70 - 80 °C bij elektroreclamatie tot vele honderden graden bij diëlektrische verwarming. Deze technieken worden dan ook toegepast in combinatie met bodemluchtonttrekking, grondwateronttrekking enzovoorts. De sanering wordt versneld door verhoging van de oplosbaarheid, de dampspanning, de oplossnelheid en de permeabiliteit, terwijl ook een opwaartse stroming van het grondwater kan ontstaan door de temperatuurverschillen.

Voor toepassing in rijpingsdepots worden de technieken 4, 5 en 6 ongeschikt geacht, omdat de kosten hiervan (zeer) hoog zijn, de specie onvoldoende doorlatend is en elektroreclamatie vooral geschikt is voor verzadigde systemen, terwijl de specie juist moet worden gedroogd. Verder zullen de relatief hoge temperaturen wellicht remmend werken op een aantal biologische processen. De ervaring bij landfarming (technieken 1, 2 en 3) is eventueel wel bruikbaar voor versnelde rijping van baggerspecie, maar er is in de literatuur geen informatie gevonden over praktijkervaringen, bijvoorbeeld grootschalige proeven bij verschillende temperaturen. Uit onderzoek op laboratoriumschaal [2, 3] is duidelijk dat de rijping is te versnellen, maar hierbij spelen verschillende factoren een rol. Naast temperatuurverhoging tot 30 - 35 °C worden condities aangelegd, waarbij de verdamping wordt gestimuleerd en/of de zuurstoftoevoer wordt vergroot. Het is dan mogelijk om de rijping in 6 tot 8 weken te voltooien. Op praktijkschaal zal de rijping in elk geval langer duren, omdat transportprocessen bij een grotere laagdikte meer tijd zullen vergen.

Het is duidelijk dat in eerste instantie de droging (met name de verdamping) de snelheid van de rijping zal limiteren. Als het materiaal voldoende gedroogd is, kunnen verschillende processen limiterend worden, zoals het transport van zuurstof, desorptie van verontreinigingen en de activiteit van de micro-organismen.

2.4 Knelpunten en aandachtspunten van het onderzoek

Met de grootschalige bewerking van baggerspecie in depots is nog weinig ervaring opgedaan. Wel bestaan er diverse initiatieven om op korte termijn over te gaan tot realisatie. De basisprocessen die in dit onderzoek nader worden bestudeerd - rijping, in situ biologische afbraak en bioleaching - zijn op zich bekend vanuit andere probleemvelden. Rijping is echter vooral gericht geweest op het fysische aspect: ontwatering en kleivorming. Daarnaast is de koppeling van rijping, evenals die van in situ biologische afbraak en bioleaching, aan restwarmte nog niet eerder bekeken. De procesmatige aanpak van depotbewerking, gekoppeld aan restwarmte, is nieuw.

Voor de ontwikkeling van de beoogde techniek zijn er aandachts-/knelpunten op het gebied van *karakterisering* van baggerspecie in verband met de verwerkbaarheid volgens het voorgestelde concept, *proceskennis*, *monitoring en sturing* en *beoordeling van het eindresultaat* (is het eindproduct toepasbaar als categorie 1 materiaal). Hierna worden enkele van deze punten uitgewerkt:

Karakterisering

Het is van groot belang te weten welke eisen gesteld moeten worden aan partijen baggerspecie om in aanmerking te komen voor een behandeling in een depot. Het streven is om een zo breed mogelijk spectrum van baggerspecie te behandelen. Aan de hand van het onderzoek moet duidelijk worden welke rendementen haalbaar zijn en welke karakteristieken van baggerspecie van invloed zijn op dit rendement. Wanneer dit bekend is, kunnen ranges van deze parameters worden bepaald, waarbinnen een behandeling in depot zinvol is. Karakterisering van een partij baggerspecie houdt dan in dat wordt nagegaan in hoeverre die partij aan de gestelde eisen voldoet.

Proceskennis: rijping

De kennis van rijping is grotendeels in de literatuur beschreven. De mogelijkheden voor versneling zijn echter nog niet goed in kaart gebracht. De meeste aandacht is gericht geweest op het versneld afvoeren van water door bijvoorbeeld begreppeling, omzetting en de toepassing van gewassen. De inzet van restwarmte zal naar verwachting een aantal effecten hebben. Ten eerste zal de ontwatering van specie worden versneld. Ten tweede zullen de biologische en chemische processen worden beïnvloed. De mate waarin een en ander gebeurt en welke temperatuur optimaal is, is momenteel niet bekend en vormt onderdeel van deze studie.

Proceskennis: biologische afbraak

Biologische afbraak en rijping vertonen veel wisselwerking. Omtrent biologische afbraak is voldoende literatuur beschikbaar. Ook bij de aanbiedende partners is in ruime mate ervaring opgedaan met biologische reiniging van baggerspecie. Gebleken is dat de meeste maatregelen die gericht zijn op stimulatie van de afbraak geen al te groot effect hebben. Gekeken is onder andere naar de toevoeging van speciaal gekweekte bacteriën, alternatieve zuurstofdonoren, de inzet van funghi en van detergenten [11]. De meeste maatregelen beogen het verbeteren van de beschikbaarheid of het introduceren van meer (specifieke) biomassa. Het verhogen van de temperatuur richt zich echter op een ander aspect van de biologische afbraak, namelijk de reactiesnelheid van de omzetting en beïnvloeding van het sorptie-evenwicht tussen het sediment en de waterfase. Biologische processen zijn temperatuurafhankelijk; er zijn temperatuurminima, -optima en -maxima voor biologische activiteit. Temperatuurverhogingen van 10 °C kunnen bijvoorbeeld de activiteit van sulfaatreductie of O₂-opname in het sediment met respectievelijk een factor 3 - 3,5 doen toenemen. Ter vergelijking: van chemisch/fysische processen is bekend dat de snelheid verdubbelt bij circa 7 °C temperatuurstijging. De temperatuuroptima van de verschillende rijpingsprocessen zijn echter niet goed bekend.

Proceskennis: uitvoeringstechniek, opwarming en regulatie van fysische rijping

Een centraal punt is het overbrengen van restwarmte op de baggerspecie. Hiertoe zijn een aantal concepten denkbaar, bijvoorbeeld buizen onderin het depot. Bij voorbaat is niet aan te geven welke methode optimaal is. Een ander aandachtspunt is de wijze waarop de koppeling

met de installaties van een elektriciteitscentrale tot stand moet komen en de sturing van het warmteaanbod naar het depot. De voor de hand liggende toets van het concept van opwarming is het verwarmen van een hoeveelheid specie in een proefdepot. Hiertoe zal echter kennis nodig zijn van het gedrag van de specie tijdens de opwarming. Met name te snelle uitdroging is een verschijnsel dat zou kunnen optreden en dat het proces negatief kan beïnvloeden. Een te snelle droging zal leiden tot een harde, slecht doorlatende koek. Transport van zuurstof zal dan worden geremd, tevens is een te laag vochtgehalte op zichzelf al remmend voor microbiologische activiteit. Het onderzoek zal moeten leiden tot inzicht in de wijze waarop het vochtgehalte in de hand kan worden gehouden en welke kritische grenzen van doorlatendheid gelden.

Proceskennis: uitvoeringstechniek, inbrengen/ontwatering

Belangrijk bij de behandeling in depot is een snelle ontwatering. Rijping en biologische afbraak kunnen pas plaatsvinden wanneer het grootste gedeelte van het water is verwijderd. Procestech- nisch gezien zijn er een aantal keuzes om dit te bereiken. Een mogelijkheid is het werken in dunne lagen die elk na elkaar met bijvoorbeeld de inzet van restwarmte worden gedroogd. Dit is gecompliceerder dan het in één keer aanbrengen van een dikkere laag, maar het resulteert mogelijk in een versnelling van het proces.

Proceskennis: zuurstoftoevoer

Het beluchten van een depot is een optie die voordelen biedt, maar die tevens moeilijk uitvoer- baar is. Door de slechte doorlaatbaarheid van de specie wordt beluchting ernstig bemoeilijkt. Door verwarming zal een opwaartse flux van warmte en vocht ontstaan. Nagegaan dient te worden of extra toevoer van lucht hieraan gekoppeld kan worden ('schoorsteeneffect'). Bij 'heap leaching' in de mijnbouw wordt de warmteontwikkeling van exotherme reacties op deze wijze be- nut; dit materiaal is echter beter doorlatend dan baggerspecie.

Proceskennis: bioleaching

Een potentieel knelpunt voor een deel van de uitvoeringsvarianten van bioleaching is de slechte doorlatendheid van baggerspecie. Bij percolatie van bovengronds geproduceerd zuur zal de doorlatendheid niet of in mindere mate limiterend zijn. Het is echter de vraag of percolatie van bovengronds geproduceerd zuur te combineren is met afbraak van organische verontreinigingen. Een sequentieel proces is een alternatief (eerst rijping/landfarming, daarna bioleaching, of omge- keerd). maar zal wel resulteren in een langere verblijftijd. De beste optie is om uit te gaan van in- terne zuurproductie, hetgeen te combineren is met rijping/afbraak van organische componenten. De benodigde hoeveelheid zuur kan, bij verhoogde temperatuur, naar verwachting in globaal drie maanden worden geproduceerd. Het is echter onduidelijk of de doorlatendheid van de specie de toevoer van de benodigde lucht mogelijk maakt. Voor bioleaching gelden daarom de volgende potentiële knelpunten:

1. slechte *doorlatendheid* van de baggerspecie resulteert in (economisch) minder gunstige uit- voeringsvarianten;
2. zowel bij een slechte doorlatendheid als bij een sequentieel proces kan de benodigde *verblijf- tijd* een knelpunt vormen.

Algemeen geldt dat de verwijdering van zware metalen slechts voor een deel van het aanbod van specie nodig zal zijn. Bioleaching kan een nabehandelingsstap vormen, die de behandeling van de bulk van het aanbod niet behoeft te vertragen.

Monitoring en sturing

Een aantal aspecten zijn zodanig belangrijk dat deze goed moeten worden gevolgd. Dit betreft met name het mogelijk uitdrogen van de specie, de aëratie en de pH. Onduidelijk is momenteel op welke wijze de verschillende processen (drogen, rijping/landfarming en bioleaching) het beste kunnen worden gemonitord. Hierbij speelt ook de interactie met het weer een belangrijke rol. De

buitentemperatuur, regenval, enzovoorts zullen het droogproces mede beïnvloeden. In het ideale geval kan het proces worden gestuurd op basis van een model. Nagegaan moet worden welke parameters minimaal moeten worden gemeten.

HOOFDSTUK 3

OPZET VAN HET ONDERZOEK

3.1 Inleiding

Het onderzoek naar de versnelde rijping van baggerspecie is opgesplitst in een drietal fasen:

- Fase I: Laboratoriumonderzoek en warmteberekeningen.
- Fase II: Veldproef.
- Fase III: Ontwerp van een praktijkdepot en kostenberekening.

De laboratoriumproeven moeten informatie opleveren over belangrijke kengetallen als de warmtecapaciteit, het opwarm- en drooggedrag en de maximale effecten van behandeling bij verhoogde temperatuur. Bij de warmteberekeningen zal vervolgens de warmtebehoefte van het proces worden bepaald. De veldproef zal uitwijzen of de resultaten van deze twee fasen ook in de praktijk opgaan. Vervolgens zal met de verkregen inzichten een concept worden uitgewerkt voor de grootschalige toepassing van versnelde rijping.

3.2 Opzet van het laboratoriumonderzoek en warmteberekeningen

Selectie van monsters

De selectie van monsters is gebaseerd op analysegegevens uit 1997 van baggerspecie uit de Maas in Limburg, zoals beschikbaar gesteld door RWS Limburg. Gezien de aanwezige verontreinigingen en de wens om qua textuur verschillende monsters in te zetten, is er naar gestreefd om monsters te verkrijgen die verontreinigd zijn met zware metalen (Cd en Zn) en minerale olie of PAK en die duidelijk verschillen qua zandgehalte, namelijk maximaal 15 % en maximaal 40 % > 63 µm. Op basis van de beschikbare gegevens is gekozen voor monsterneming nabij de stuwen van Sambeek en Belfeld.

Bepaling van warmteparameters

Om de opwarming van baggerspecie te kunnen modelleren, moeten enkele fundamentele parameters bekend zijn, met name de warmtecapaciteit en de warmtegeleidingscoëfficiënt. De warmtecapaciteit zal worden berekend op basis van de macrosamenstelling van de specie en beide parameters zullen door meting in het laboratorium worden bepaald.

Inventarisatie van warmteaanbod

Voor zowel de keuze van de laboratoriumcondities als de opzet van een praktijkproef is het belangrijk om inzicht te hebben in het warmteaanbod van de centrale, met name de temperatuur van het koelwater en de fluctuaties daarin. Deze informatie is opgevraagd bij EPZ.

Proeven

Er zijn twee verschillende series proeven ingezet, één met 'vaste' specie die als doel heeft de invloed van verwarming op de fysische rijping van de specie te kunnen beschrijven en één met de specie in *slurryvorm* die als doel heeft om maximale effecten van de opwarming op de snelheid van de (chemische en biologische) rijpingsreacties in kaart te brengen.

1. **Invloed van verwarming op fysische rijping van de specie**

De opwarming in depot wordt gesimuleerd door een hoeveelheid 'vaste' specie in emmers van onderaf te verwarmen. Als referentie wordt een proef ingezet zonder verwarming. Op een aantal tijdstippen en op verschillende hoogten in de sliblaag worden de temperatuur en het droge stofgehalte bepaald. Deze proef geeft een eerste indruk van de versnelling van de fysische rijping door verwarming en effecten van de laagdikte. Verder zal worden nagegaan of

de meetresultaten modelmatig te beschrijven zijn en bij welke droge stofgehalten verkitting optreedt.

2. **Maximaal temperatuureffect op de kinetiek van chemische/biologische rijpingsreacties**

Voor een haalbaar proces moet niet alleen de fysische rijping worden versneld maar ook de chemische en biologische rijpingsreacties. Om vast te stellen wat het *maximale* effect is van temperatuurverhoging, zijn proeven uitgevoerd in slurrsystemen bij verschillende temperaturen, namelijk 10 °C (jaargemiddelde temperatuur in Nederland), 20 °C (matig verhoogde temperatuur) en 30 °C (verhoogde temperatuur). Het voordeel van een slurrsysteem is dat de omstandigheden bij de verschillende temperaturen identiek zijn, zodat het temperatuureffect is te onderscheiden van andere processen die de snelheid van de reacties kunnen beïnvloeden, zoals transportprocessen, beschikbaarheid van zuurstof en uitdroging.

Warmteberekeningen

Op basis van de proefresultaten kan de optimale temperatuur worden vastgesteld en kan de warmtebehoefte globaal worden berekend. Aspecten waar rekening mee wordt gehouden zijn de warmtecapaciteit van het materiaal (hoeveel warmte is er nodig om het materiaal op temperatuur te brengen), de verdampingswarmte (hoeveel warmte is er nodig om het aanwezige water te verdampen) en de warmteverliezen naar de omgeving gedurende de rijping.

3.3 **Opzet van de veldproef**

De proef is uitgevoerd met specie uit het sluzencomplex in de Maas bij Belfeld. Vergelijkbaar materiaal is ook gebruikt bij de laboratoriumproeven. De specie is met een kraanschip bemonsterd, overgebracht in een container en vervoerd naar de proeflocatie in Zutphen.

Op het terrein van Midden Betuwe Slibverwerking in Zutphen zijn een drietal proefdepots aangelegd met afmetingen van 2 bij 1 m. De depots zijn voorzien van een onderafdichting van folie en een laag drainzand met daarin een drain. Op het drainzand is de baggerspecie aangebracht met een aanvangsdikte van circa 70 cm. In twee van de drie depots is in de drainzandlaag een elektrische verwarming aangebracht. De gemiddelde temperatuur in de depots (dit is de temperatuur halverwege de specielaag) is via een sensor gestuurd op 5 °C (vak 2) respectievelijk 10 °C (vak 3) boven de maandgemiddelde bodemtemperatuur. Vak 1, de referentie, was onverwarmd. De temperatuur in de vakken is continu geregistreerd met temperatuurloggers op drie verschillende diepten (het referentievak alleen halverwege).

De proefdepots zijn tweewekelijks bezocht, waarbij afwisselend de volgende werkzaamheden zijn uitgevoerd:

1. afpompen van het eventueel aanwezige drainwater en water op het oppervlak, uitlezen van de temperatuurloggers, registreren van het stroomverbruik, overige waarnemingen (bijvoorbeeld scheurvorming in de rijpende specie);
2. monsterneming. Bij iedere monsterneming is de specie verdeeld in drie lagen van gelijke dikte. De parameters droge stof en situdichtheid zijn laagsgewijs bepaald, de overige parameters meestal in mengmonsters van de drie lagen.

Teneinde het rijpingsproces te kunnen volgen zijn de volgende parameters regelmatig bepaald:

- fysische rijping: droge stof en situdichtheid, laagsgewijs;
- chemische rijping: in de vaste stof gloeiverlies, minerale olie, PAK's, sulfaat en totaal-zwavel, verder is ook de uitloging van cadmium, zink, sulfaat, ijzer, mangaan en totaal-zwavel bepaald.

Het uitgangsmateriaal en het eindmonster zijn uitgebreider gekarakteriseerd. Om tevoren een indruk te krijgen van de maximale effecten van rijping is een versnelde rijpingsproef uitgevoerd.

Door vergelijking van de fysische en de chemische rijping in de drie compartimenten kan worden vastgesteld wat de effecten zijn van verwarming. Via de registratie van het energieverbruik, een analyse van de vochthuishouding en de weersomstandigheden en een kwantificering van de mate van versnelling van de rijping, kunnen de kosten en baten van verwarming worden onderbouwd.

3.4 Ontwerp van een praktijkdepot en kostenberekening

Bij het beoordelen van de haalbaarheid van het concept voor grootschalige toepassing is onderscheid gemaakt in:

1. technische haalbaarheid;
2. economische haalbaarheid.

Om hierover uitspraken te kunnen doen is een modeldepotontwerp gemaakt. Dit ontwerp is vervolgens getoetst op de technische haalbaarheid. Met name is gekeken naar de effectiviteit van het inbrengen van warmte en naar de vochthuishouding. Voor de beoordeling van de economische haalbaarheid zijn de investerings- en exploitatiekosten vergeleken van het modeldepot met versnelde rijping en een depot ingericht op de traditionele wijze. Belangrijke aandachtspunten hierbij zijn de verschillen in benodigde ruimte (grondkosten), investeringen in het verwarmingssysteem, energiekosten, hoeveelheid eindproduct en hoeveelheid afvalwater.

HOOFDSTUK 4

LABORATORIUMONDERZOEK

In dit hoofdstuk wordt het laboratoriumonderzoek besproken. Na de aandachtspunten van het onderzoek wordt ingegaan op de gebruikte materialen en methoden. Vervolgens komen de resultaten van de karakterisering van de specie, het onderzoek naar de rijping van de specie onder invloed van verwarming en de bepaling van de warmteparameters aan de orde.

4.1 Aandachtspunten

De belangrijkste aandachtspunten bij de laboratoriumproeven zijn:

Karakterisering van de baggerspecie

Het 'drooggedrag' van de baggerspecie en daarmee ook de invloed van opwarming is sterk afhankelijk van de macrosamenstelling (aandeel klei, zand en organische stof). Het is daarom belangrijk om verschillende typen specie te onderzoeken. De effecten van de behandeling moeten verder in kaart worden gebracht door evaluatie van de kwaliteits(veranderingen) gedurende de rijping, waardoor eventuele relaties kunnen worden gelegd tussen speciekenmerken en afbraakrendementen enzovoorts.

Verloop van de rijping en afbraak van organische verontreinigingen

Aangezien het verloop van de processen door schaafeffecten in het veld anders is dan in het laboratorium, heeft het weinig zin om uitgebreid onderzoek te doen in het laboratorium. Om toch een indruk te krijgen van de effectiviteit van temperatuurverhoging is het wel zinvol om onder overigens identieke omstandigheden het verloop van de rijping te bestuderen bij verschillende temperaturen.

Uitvoeringstechniek en procesregulatie

Uit het laboratoriumonderzoek moeten met name gegevens volgen om tot een verantwoorde opzet te komen van een veldproef. Qua methodiek ligt verwarming vanaf de onderzijde het meest voor de hand. De temperatuur van het water moet representatief zijn voor de temperatuur van het koelwater van de centrale. Belangrijk is om inzicht te verkrijgen in het verloop van de droging in de tijd en op verschillende hoogten in de drogende laag, zodat duidelijk wordt of er kans is op uitdroging. Het onderzoek moet voldoende gegevens opleveren om het gedrag op veldschaal modelmatig te kunnen inschatten. Hieronder wordt verstaan dat de vereiste warmtetoevoer en de optimale laagdikte kunnen worden vastgesteld.

Zuurstoftoevoer en bioleaching

Zuurstoftoevoer en bioleaching worden niet onderzocht op laboratoriumschaal. In hoeverre zuurstoftoevoer een belangrijk knelpunt is, is onduidelijk en gezien de schaafeffecten kan dit aspect beter worden meegenomen bij de veldproef. Voor bioleaching geldt dat het proces hierdoor extra gecompliceerd wordt, zodat besloten is om in eerste instantie te volstaan met een theoretische beschouwing van de haalbaarheid.

Monitoring en sturing

Voor de laboratoriumproeven geldt dat monitoring van het verloop van de fysische en chemische rijping belangrijk is. De fysische rijping is te beschrijven op basis van het verloop van het droge stofgehalte, de chemische rijping op basis van de zwaveloxidatie (toename van het sulfaatgehalte), de stikstofoxidatie (toename van nitraat) en de ijzeroxidatie (afname van oplosbaar ijzer). Daarnaast is de temperatuur uiteraard van groot belang. Aangezien momenteel nog niet duidelijk is of er goede correlaties zijn tussen de rijpingsreacties op macroschaal en de omzet-

tingen van verontreinigingen, is het tevens belangrijk om het verloop van enkele kritische verontreinigingen te volgen. Sturing van het proces wordt vooralsnog beperkt tot de tijdsduur van proeven, die wordt afgeleid uit het verloop van de genoemde parameters.

4.2 Materialen en methoden

4.2.1 *Monsterneming van de baggerspecie*

De baggerspecie werd bemonsterd in de toeleidingskanalen naar de sluizen bij Sambeek en Belfeld. De toeleidingskanalen zijn aftakkingen van de Maas, waarin door een beperkte stroomsnelheid slib bezinkt. De monsterneming werd uitgevoerd op 5 mei 1998 met behulp van een boot en een zuigerboor.

4.2.2 *Karakterisering van het uitgangsmateriaal*

Van het uitgangsmateriaal (twee monsters) werden de volgende parameters bepaald: droge stof, gloeiverlies, fracties < 2 μm en < 16 μm , zeefkromme 63 - 2000 μm , Kjeldahl-stikstof, totaal-P, Ca-carbonaat, cadmium, chroom, koper, nikkel, lood, zink, arseen, kwik, minerale olie en PAK (16 EPA).

4.2.3 *Bepaling van het maximale effect van temperatuurverhoging*

Het effect van temperatuurverhoging werd onderzocht door slurryproeven in te zetten met beide speciesoorten, bij temperaturen van 10 °C, 20 °C en 30 °C. Voor alle proeven gold dat de slurry een L/S-verhouding had van 10 en dat continu werd geroerd en continu lucht werd doorgeleid. Verdampingsverliezen werden gecompenseerd door demiwater toe te voegen. De opstelling voor de proef bij 20 °C stond in een laboratoriumzaal en de overige opstellingen in klimaatkasten. De volgende parameters werden frequent (om de 2 - 5 dagen) in de slurry gemeten: temperatuur, zuurstofconcentratie, pH, geleidbaarheid en redoxpotentiaal. Verder werden er regelmatig monsters genomen halverwege het slurryniveau. Deze monsters werden door centrifugeren gedurende 15 minuten bij 1600 rpm en filtratie over 0,45 μm gesplitst in een vaste fase en een vloeistoffase. De vaste stof werd geanalyseerd op droogrest, organische stof, Ca-carbonaat, minerale olie en PAK's, de vloeistof op nitraat, sulfaat, ijzer, calcium, koper en zink. Deze analyses werden uitgevoerd op de volgende tijdstippen: 1, 2, 5, 7, 14, 21, 28 en 56 dagen na de start. De eindanalyse na 56 dagen werd in duplo uitgevoerd, de overige analyses in enkelvoud. De vaste stof werd alleen na 14, 28 en 56 dagen geanalyseerd.

4.2.4 *Bepaling van het drooggedrag en temperatuurprofiel*

Het droog- en opwarmgedrag van de Belfeld-specie werd onderzocht door 5 emmers met circa 20 l specie te vullen. De hoogte van de sliblaag was bij de start circa 30 cm. De emmers werden aan de zijkant geïsoleerd met glaswol, aan de bovenzijde waren ze open zodat water kon verdampen. Vier van de vijf emmers werden voorzien van een dubbele bodem waardoor water werd gepompt met een temperatuur van circa 40 °C. Dit water werd op temperatuur gehouden met een thermostaatbad. De vijfde emmer was de referentie, die niet werd verwarmd. De emmers stonden in een laboratoriumruimte met een temperatuur van circa 20 °C.

Door consolidatie ontstond er bovenop de specie een laagje water, dat na 10 dagen werd afgezogen (in de praktijk wordt dit water wellicht door drainage en afstroming verwijderd). Het ging hierbij in de verwarmde emmers om 150 - 210 ml en in de referentie om 130 ml.

De droging werd visueel en op basis van gewichtsverlies beoordeeld. Na een gewichtsafname van 10 % werd na 35 dagen de eerste emmer bemonsterd. Bij iedere monsterneming werd de temperatuur op verschillende hoogten gemeten met een thermokoppel en werden met een kleine gutsboor monsters genomen op drie hoogten (onderin, halverwege en bovenin). De volgende emmers werden bemonsterd na 65, 93 en 101 dagen. Op dit laatste tijdstip werd ook de referentie bemonsterd.

4.2.5 Bepaling van de warmteparameters

Voor een beschrijving van de bepaling van de warmtecapaciteit en de warmtegeleidingscoëfficiënt wordt verwezen naar bijlage A.

4.3 Resultaten

4.3.1 Kwaliteit van het uitgangsmateriaal

In tabel 1 zijn de belangrijkste analyseresultaten van de bij Sambeek en Belfeld bemonsterde species weergegeven. De volledige gegevens zijn vermeld in de deelrapportage over Fase I [12].

Volgens een in de baggerpraktijk gebruikelijke indeling [13] liggen de monsters (met name Belfeld) in het grensgebied van zandige en kleiige specie. Volgens NEN 5104 zou het materiaal na rijping als silt worden geclassificeerd.

Tabel 1. Analyseresultaten van het uitgangsmateriaal.

parameter	Sambeek	Belfeld
droge stofgehalte	55,3 %	50,2 %
gloeirest	92 % van ds	90 % van ds
organisch stofgehalte	8 % van ds	10 % van ds
fractie < 2 µm	15 % van ds	13 % van ds
fractie < 16 µm	28 % van ds	23 % van ds
fractie < 63 µm	74 % van ds	61 % van ds
calciumcarbonaat	5,5 % van ds	9,6 % van ds
Kjeldahl-stikstof	0,8 g/kg ds	3,1 g/kg ds
fosfor-totaal	3,0 g/kg d.s.	7,4 g/kg ds
sulfaat	88 mg/kg ds	120 mg/kg ds
PAK	22 mg/kg ds	22 mg/kg ds
minerale olie	1300 mg/kg ds	1400 mg/kg ds
arseen	20 mg/kg ds	16 mg/kg ds
cadmium	14 mg/kg ds	11 mg/kg ds
chromium	65 mg/kg ds	70 mg/kg ds
koper	95 mg/kg ds	90 mg/kg ds
kwik	1,3 mg/kg ds	1,7 mg/kg ds
nikkel	28 mg/kg ds	28 mg/kg ds
lood	190 mg/kg ds	150 mg/kg ds
zink	1200 mg/kg ds	950 mg/kg ds

De twee species verschillen minder van elkaar dan werd verwacht. Wel is de Belfeld-specie zandiger dan die van Sambeek (circa 40 resp. 25 % zand). Ook is het materiaal uit Belfeld sterker gebufferd door een hoger kalkgehalte. De verontreinigingsgraad van beide species is vrijwel identiek. Op basis van het Bouwstoffenbesluit zouden beide materialen niet toepasbaar zijn omdat de gehalten aan minerale olie, zink en in het geval van Sambeek tevens cadmium, de grenswaarden overschrijden. De verwijderingsrendementen, die vereist zijn om aan de grenswaarden te voldoen, zijn weergegeven in tabel 2. Deze liggen in de range van 30 tot ruim 60 %, waarden die bij processen als landfarming en bioleaching haalbaar zijn.

Tabel 2. Vereiste rendementen om te voldoen aan de samenstellingsnormen van het Bouwstoffenbesluit [4] ¹⁾.

parameter	Sambeek	Belfeld
minerale olie (%)	62	64
cadmium (%)	30	0
zink (%)	54	44

¹⁾ Rendementen voor metalen zijn berekend op basis van de grenswaarden van het IPO-interimbeleid. Deze wijken iets af van de toekomstige grenswaarden van het Bouwstoffenbesluit.

4.3.2 *Temperatuureffecten op de kinetiek van rijping en eindkwaliteit*

De volledige meet- en analyseresultaten zijn getalsmatig en grafisch weergegeven in de deelrapportage van Fase I [12]. In deze paragraaf worden achtereenvolgens besproken:

- condities bij de proeven;
- omzettingen tijdens de rijping;
- temperatuureffecten op de snelheid van de rijpingsreacties;
- temperatuureffecten op de eindkwaliteit van de specie.

Conditie bij de proeven

De condities tijdens de proeven zijn samengevat in tabel 3. Hieruit blijkt dat de gewenste temperaturen goed zijn benaderd, zuurstof zeker niet beperkend is geweest, de pH vrijwel neutraal is gebleven en dat de redox, analoog aan het zuurstofgehalte, op aërobe condities duidt. De verschillen in zuurstofgehalte en redoxpotentiaal bij de verschillende proeven worden primair veroorzaakt door een vermindering van de oplosbaarheid van zuurstof bij temperatuurverhoging.

Tabel 3. Conditie tijdens de slurryrijping: gemiddelden tijdens de proeven.

parameter	Sambeek			Belfeld		
	10 °C	20 °C	30 °C	10 °C	20 °C	30 °C
temperatuur (°C)	9,5	19	29	9,5	19	29
zuurstof (mg O ₂ /l)	11,1	8,8	7,3	11,0	8,7	7,2
pH	7,7	7,6	7,5	7,7	7,6	7,4
redoxpotentiaal (mV)	460	450	430	460	450	425

Omzettingen tijdens de rijping

De omzettingen tijdens de rijping worden per component besproken:

- pH: deze vertoont een daling van 0,1 - 0,5 eenheid gedurende de rijping (verschil tussen dag 1 en dag 56). Dit betekent dat er weliswaar productie van zuur plaatsvindt door oxidatiereducties (sulfide, organische stof, ammonium, ijzer), maar dat de specie zodanig gebufferd is dat geen sterke verzuring optreedt.
- Geleidbaarheid: deze neemt gedurende de rijping met een factor 2 - 3 toe, hetgeen verklaard wordt uit de vorming van oplosbare zouten, zoals sulfaat, nitraat en bicarbonaat, waarbij calcium het belangrijkste tegenion is.
- Redoxpotentiaal: deze stijgt in enkele dagen van 250 - 300 mV naar 400 - 500 mV. Dit komt primair door de geforceerde toevoer van zuurstof en secundair doordat de specie een meer geoxideerd karakter krijgt.

- Organische stof: het gehalte blijft overwegend constant, hoewel er aanzienlijke fluctuaties zijn. Bij Sambeek 10 en 20 °C is er een tendens tot toename, hetgeen onwaarschijnlijk is. Uit dublobepalingen blijken verschillen tot 25 %, hetgeen zal samenhangen met het bekende feit dat het lastig is om representatieve monsters te nemen uit slurry's. Dit geldt overigens alleen voor de vaste fractie, die neigt tot ontmenging (zwaardere delen bevinden zich meer onderin het vat). Bij de interpretatie van metingen in de vaste fase moet hier rekening mee worden gehouden.
- CaCO₃: hoewel ook voor deze parameter aanzienlijke fluctuaties worden gevonden, is er een tendens tot afname van een orde van grootte van 10 %. Dit is in overeenstemming met de beperkte omvang van de zuurvormende reacties.
- Nitraat, sulfaat en calcium: de concentraties nemen gedurende de rijping sterk toe, hetgeen verklaard wordt uit de oxidatie van respectievelijk ammonium en sulfide en de omzetting van kalk in gips en Ca-bicarbonaat.
- IJzer: door oxidatie van tweewaardig naar driewaardig ijzer neemt de concentratie opgelost ijzer snel af.
- Koper: de uitloging van koper tendeert naar een toename, die in absolute termen beperkt is. Bij sommige proeven lijkt het erop dat de toename wordt gevolgd door een afname (tijdelijke uitlooppieken). Bij de meeste proeven blijft het niveau na een initiële toename min of meer constant.
- Zink: de uitloging van zink neemt aanvankelijk bij alle proeven toe. Bij 10 °C zet deze toename zich gedurende de hele proef door, bij hogere temperaturen treedt bij een lager concentratieniveau een stabilisatie op, terwijl bij 30 °C in de tweede helft van de proef de zinkuitloging gaat dalen. Blijkbaar treedt eerst een mobilisatie op (wellicht door oxidatie van sulfiden) en worden op termijn nieuwe, slecht oplosbare verbindingen gevormd. Deze reacties worden versneld door temperatuurverhoging.

Het verloop van de concentraties aan opgelost sulfaat, nitraat, ijzer en calcium is voor Belfeld-specie bij 20 °C uitgezet in figuur 1. Afgezien van de snelheid van de reacties, is het verloop bij andere temperaturen en bij de Sambeek-specie vergelijkbaar. Dit geldt ook voor het verloop bij rijpingsproeven met andere baggerspecies [2, 3].

Uit figuur 1 blijkt dat de ijzeroxidatie het snelst (grotendeels) is voltooid, gevolgd door de stikstof-oxidatie en op enige afstand gevolgd door de zwaveloxidatie. De vorming van sulfaat en nitraat is gekenmerkt door een snelle initiële toename, waarna een afvlakking optreedt (logaritmisch verloop). Dit verloop wordt waarschijnlijk verklaard uit de aanwezigheid van direct beschikbaar substraat en substraat dat moeilijk of pas na omzettingen beschikbaar komt, plus de tijd die nodig is voor groei van de biomassa (in de verse specie zal geen grote populatie van oxideerders aanwezig zijn). Dit betekent dat de omzetting aanvankelijk wordt gelimiteerd door de activiteit van de micro-organismen en in tweede instantie door de beschikbaarheid van substraat.

Volgens figuur 2 is het verloop van de afbraak van minerale olie en PAK's vergelijkbaar met de vorming van sulfaat, maar door de grote spreiding die optreedt bij verschillende proeven is dit niet zeker.

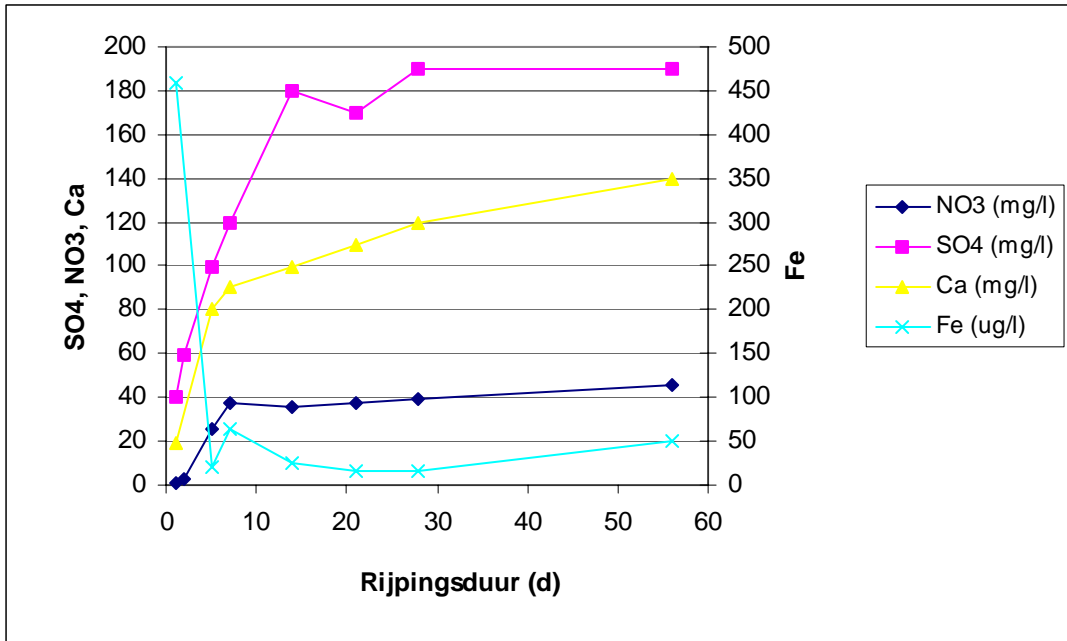


Fig. 1. Verloop van de vloeistofconcentraties van sulfaat, nitraat, ijzer en calcium bij slurryrijping van Belfeld-specie bij 20 °C.

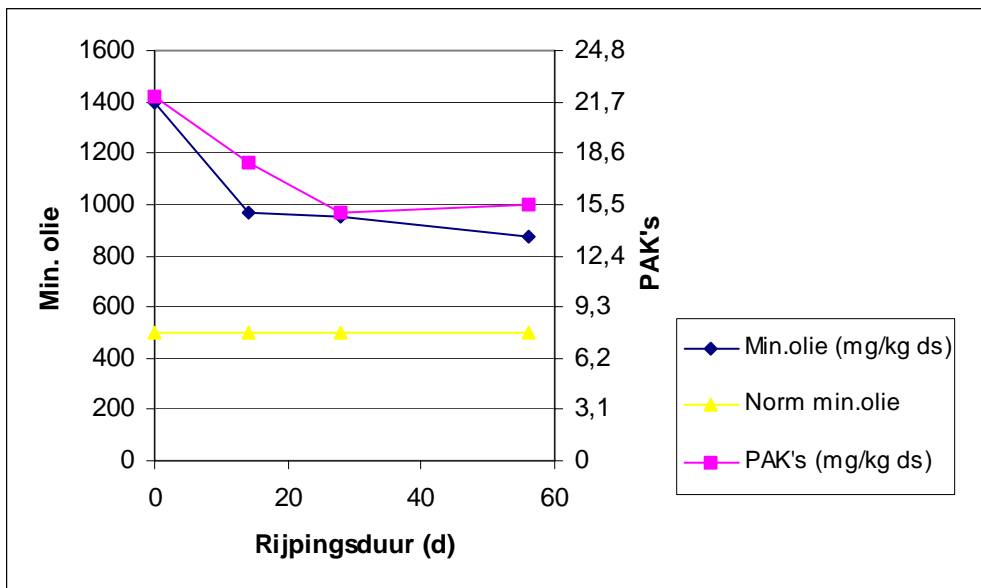


Fig. 2. Verloop van de vaste stofgehalten van minerale olie en PAK's bij slurryrijping van Belfeld-specie bij 30 °C.

Het verloop van de zinkuitloging bij de rijping van Sambeek-specie is uitgezet in figuur 3. Het is duidelijk dat, naarmate de temperatuur stijgt, er eerder een stabilisatie van de uitloging optreedt, gevolgd door een afname. Hiervoor is de nieuwvorming van onoplosbare mineralen en/of een sterke binding aan de vaste fase verantwoordelijk. Zowel de vorming van nieuwe mineralen als de diffusie van zink in de kleistrukturen zal sneller verlopen bij hogere temperaturen.

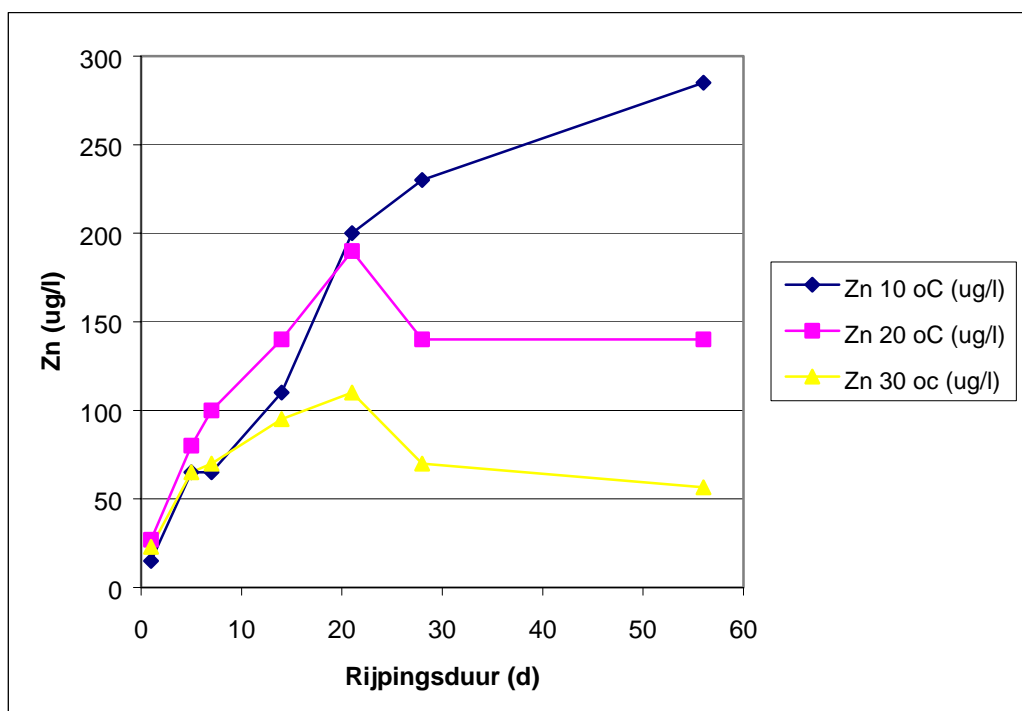


Fig. 3. Verloop van de uitloogemissies van zink bij rijping van Sambeek-specie bij verschillende temperaturen.

Temperatuureffecten op de snelheid van rijpingsreacties

De temperatuureffecten worden geëvalueerd door na te gaan hoeveel tijd er nodig is voor het verlopen van de rijpingsreacties. Zoals vermeld onder "Omzettingen tijdens de rijping" van deze paragraaf, verlopen veel omzettingen eerst snel en vindt daarna nog een langzame toename plaats, die gedurende de gehele proef kan doorgaan. Omdat er dan niet kan worden gesproken van een 'eindpunt' van de rijping, worden reactietijden vergeleken op basis van een omzetting van bijvoorbeeld 75 % van de totale omzetting. Een dergelijke benadering is in overeenstemming met de praktijk, waar de chemische rijpingsreacties na 1 jaar ook niet voor 100 % zijn verlopen [3].

Tabel 4 laat zien dat (macro-)chemische rijpingsreacties bij 30 °C een factor 2 - 4 sneller verlopen en bij 20 °C een factor 1 - 2 sneller ten opzichte van de jaargemiddelde Nederlandse temperatuur van 10 °C.

Tabel 4. Temperatuureffecten op de kinetiek van rijpingsreacties: tijd (d) benodigd voor het verlopen van (het grootste deel) van een rijpingsreactie.

reactie	Sambeek			Belfeld		
	10 °C	20 °C	30 °C	10 °C	20 °C	30 °C
Fe-oxidatie	21	14	7	14	5	5
70 % NO ₃ -vorming ¹⁾	≈ 11	5	5	14	7	5
75 % SO ₄ -vorming	21	(28)	5	≈ 12	≈ 9	≈ 6
stabilisatie Zn-uitloging	≥ 56	21	21	≥ 56	21	14

¹⁾ Voor Sambeek is dit 55 - 60 %.

Voor de afbraaksnelheden van minerale olie en PAK's is een dergelijke factor niet goed aan te geven, omdat bij de meeste proeven weinig of geen afbraak is vastgesteld. In tabel 5 zijn de af-

braakpercentages samengevat. Ondanks de relatief hoge spreiding kan wel worden geconcludeerd dat er bij 10 °C vrijwel geen afbraak optreedt. Dit geldt ook bij 20 °C voor Sambeek, terwijl in het Belfeld-materiaal wel afbraak optreedt. Bij 30 °C worden in beide monsters minerale olie en PAK voor 30 - 40 % afgebroken.

Op basis van de fluctuaties in het organische stofgehalte van de specie zijn de resultaten van de Belfeld-proef betrouwbaarder dan de proef met Sambeek-materiaal. Uit de Belfeld-proef volgt op basis van de *gemiddelden* van de duplo's een toename van de afbraak met een factor 3 ten opzichte van de afbraak bij 10 - 20 °C. Als wordt uitgegaan van de individuele maximumwaarden, zijn de verschillen aanzienlijk kleiner (factor 1,5 voor minerale olie). Omdat zowel de Sambeek- als de Belfeld-proef erop wijzen dat een significante versnelling van de afbraak pas bij een temperatuur van 30 °C optreedt, wordt vooralsnog geconcludeerd dat deze waarde in de praktijk moet worden nagestreefd. Het is echter wel gewenst om het temperatureffect voor deze componenten beter te onderbouwen.

Tabel 5. Afbraakpercentages van minerale olie en PAK's na slurryrijping gedurende 56 dagen bij verschillende temperaturen. Gemiddelden van een duplobepaling. Positieve waarden betekenen dat afbraak is opgetreden, negatieve dat het gehalte is toegenomen.

reactie	Sambeek			Belfeld		
	10 °C	20 °C	30 °C	10 °C	20 °C	30 °C
afbraak van minerale olie (%)	-15	-4	32	11	11	35
afbraak van 16 EPA PAK (%)	-5	-9	39	-10	10	29

Temperatureffecten op de eindkwaliteit van de specie

De eindkwaliteit van de specie is samengevat in tabel 6. Wat de temperatureffecten betreft is er de tendens dat bij een hogere temperaturen het materiaal chemisch meer vergaand is gerijpt, hetgeen tot uiting komt in een iets lagere pH, een wat hogere geleidbaarheid (door de vorming van oplosbare zouten), hogere gehalten van de oxidatieproducten nitraat en sulfaat, een lagere uitloging van zink en lagere gehalten van PAK en minerale olie (Sambeek 30 °C vormt wat betreft sulfaat en geleidbaarheid een uitzondering op deze trends).

Tabel 6. Eindkwaliteit van de specie na slurryrijping gedurende 56 dagen bij verschillende temperaturen. Gemiddelden van duplo's.

reactie	Sambeek			Belfeld		
	10 °C	20 °C	30 °C	10 °C	20 °C	30 °C
pH	7,8	7,8	7,7	7,8	7,6	7,65
geleidbaarheid (µS/cm)	586	616	533	710	760	824
<i>uitloogemissies:</i>						
nitraat (mg/kg ds)	140	160	170	420	460	550
sulfaat (mg/kg ds)	2100	2200	1900	1700	1900	2100
calcium (mg/kg ds)	1200	1200	950	1200	1400	1400
koper (mg/kg ds)	0,21	0,24	0,21	0,27	0,36	0,25
zink (mg/kg ds)	2,9	1,4	0,38	2,2	1,9	0,55
<i>vaste stofgehalten:</i>						
minerale olie (mg/kg ds)	1500	1350	890	1250	1250	880
PAK's 16 EPA (mg/kg ds)	23	24	13,5	24	20	15,5

Uit toetsing aan het Bouwstoffenbesluit [4] blijken de volgende overschrijdingen van categorie 1 normen: sulfaat in alle monsters in relatief geringe mate en zink in het geval van de bij 10 °C gerijpte Sambeek-specie, eveneens in geringe mate (alleen bij toepassingshoogten van circa 2 m en hoger). Minerale olie overschrijdt nog steeds de samenstellingswaarde van 500 mg/kg ds, hoewel duidelijk is dat deze norm bij 30 °C dichter wordt benaderd dan bij lagere temperaturen.

Samenvatting en perspectief

Verhoging van de temperatuur tot 30 °C versnelt de rijpingsreacties in een slurrsysteem met een factor 2 - 4 ten opzichte van de gemiddelde Nederlandse temperatuur van 10 °C. Hoewel de absolute snelheid in een praktijkdepot beduidend lager zal zijn dan in een slurrsysteem, is de factor waarmee de reacties worden versneld mogelijk wel gelijk. Dit zou betekenen dat - bij een factor 2 versnelling - de depotcapaciteit kan worden verdubbeld. Een en ander moet in een proefopzet, die de praktijk goed benaderd, worden geverifieerd.

Een temperatuur van rond de 30 °C heeft duidelijk meer effect dan een temperatuur van 20 °C. In verband met de temperatuuroptima van diverse micro-organismen zou bij een veldproef moeten worden gestreefd naar een depottemperatuur van 30 - 35 °C.

Het is bij de huidige proefcondities en input niet gelukt om de grenswaarde voor minerale olie (voor hergebruik conform het Bouwstoffenbesluit) te bereiken. Wat betreft de afbraak van minerale olie zijn er op basis van praktijkwaarnemingen en andere rijpingstests perspectieven om een grotere afbraak te bereiken [14]. Factoren die hierbij een rol spelen zijn de verblijftijd (bij deze proef 2 maanden), het specietype (de afbraak varieert per specie) en mogelijk ongunstige condities in de laboratoriumopstelling, zoals een te hoge turbulentie.

Verder is het gunstig dat er in de praktijk (door regenval) ook uitspoeling van zouten optreedt, waardoor de sulfaatemissie wellicht lager zal zijn dan thans is gemeten. Dit betekent dat voor de uitloogemissies van de onderzochte species de categorie 1 waarden in principe haalbaar zijn.

4.3.3 *Drooggedrag van de specie*

Visuele waarnemingen en verloop van de proef

Door consolidatie ontstaat na 1 dag een dun waterlaagje op het slib, hetgeen na 10 dagen is genomen tot circa 2 cm. Na 10 dagen is het bovenstaande water voorzichtig afgezogen, waarbij 0,15 tot 0,2 l is verwijderd (in de praktijk zou dit water via drainage of slibkisten worden verwijderd). Tijdens het drogen krimpt het slib, waardoor het niveau daalt en er ruimte ontstaat tussen de wand en het slib. Na 28 dagen is deze ruimte circa 1,5 cm. Afgezien van wat ondiepe scheurtjes in het bovenoppervlak, blijft het slib één geheel vormen, waardoor gaandeweg een dichte en harde klomp klei ontstaat.

Verloop van de droging/fysische rijping

De volledige gegevens van deze proef zijn vermeld in de deelrapportage van Fase I [12]. Het verloop van het droge stofgehalte is weergegeven in figuur 4. Hieruit blijkt dat de droging bovenin het snelst verloopt, ondanks dat de temperatuur daar het laagst is. Blijkbaar is het watertransport door de klei de limiterende factor voor de droogsnelheid. De vorming van krimpscheuren is hierbij van groot belang en wellicht is deze in verhouding tot de praktijk niet optimaal geweest.

Onderin en halverwege de sliblaag, die bij aanvang circa 30 cm is, verloopt de droging vrijwel gelijk.

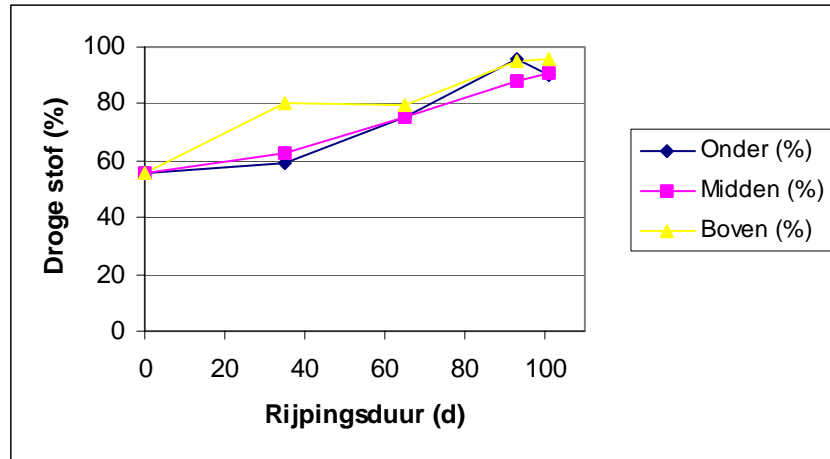


Fig. 4. Verloop van de droging van Belfeld-slib. Hoogte van de sliblaag is bij aanvang 30 cm, aan het eind 22 cm.

Uit het droge stof-, lutum- en humusgehalte kan de rijpingsfactor n worden berekend met de formule:

$$n = (A - 0,20(100 - L - H))/(L + 3H)$$

waarin:

- L is lutum (% van ds);
- H is humus (% van ds);
- A is water (% ten opzichte van ds).

Deze formule geldt alleen voor kleiige specie, voor zandige en venige species moeten andere getalswaarden worden gebruikt [14]. Een rijpingsfactor van $< 0,7$ betekent dat het materiaal fysisch is gerijpt, ofwel voldoende is gedroogd. Deze waarde wordt bij de proef al tussen 1 en 2 maanden bereikt. Na 1 maand ligt de rijpingsfactor van het materiaal in de *onderste* helft tussen 1,0 en 1,3, hetgeen de classificatie 'halfgerijpt' oplevert. Het materiaal bovenin is dan al sterk uitgedroogd.

Globaal kan daarom worden geconcludeerd dat onder de proefcondities een rijpingsduur van 1,5 maand voldoende is voor fysieke rijping. Deze proefcondities zijn: een beginhoogte van 0,3 m, een continue verwarming van onderaf met water van circa 40 °C, een vrijwel constante luchttemperatuur van 20 °C en het ontbreken van neerslag. Qua 'weersomstandigheden' is dit enigszins vergelijkbaar met het zomerhalfjaar, waarin wel regenval optreedt maar de verdamping groter is dan de hoeveelheid neerslag. In de praktijk zal de droging echter langzamer verlopen, omdat de laagdikte groter is en er door regenval extra vocht wordt aangevoerd.

De referentieproef is na 101 dagen bemonsterd en had toen onderin een droge stof van 74 % en bovenin van 80 %. Dit materiaal is dan met een rijpingsfactor van 0,45 ruim voldoende gerijpt. Het materiaal is nog net aardvochtig (niet uitgedroogd). Zowel de gehalten als het profiel van de referentie zijn vrijwel gelijk aan die van de proef met verwarming na 65 dagen. Dit betekent dat het droogproces door verwarming met een factor 1,6 wordt versneld (zowel voor de proef met verwarming als voor de referentie was een wat kortere rijpingsduur ook voldoende geweest, maar de verhoudingsfactor zal hierdoor weinig veranderen).

Verloop van de temperatuur

Het verloop van de temperatuur is als functie van de laaghoogte en op verschillende tijdstippen uitgezet in figuur 5. Uit deze figuur blijkt dat het verloop op de verschillende tijdstippen min of meer overeenkomstig is, hoewel de absolute waarden enigszins verschillen.

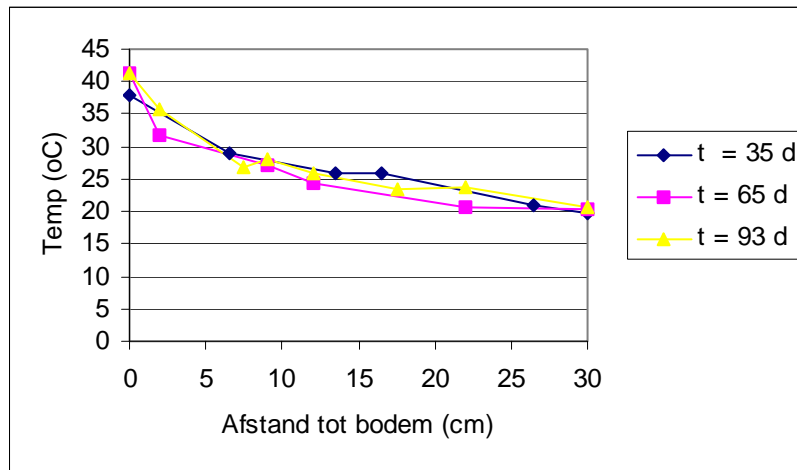


Fig. 5. Verloop van de temperatuur als functie van de laaghoogte bij droging van Belfeld-slib. Laaghoogte begin 30 cm, eind 22 cm. De waarde op de linker Y-as is de watertemperatuur, de waarde op de rechter Y-as is de luchttemperatuur.

Voor de curve op $t = 35$ d moet rekening worden gehouden met een lagere watertemperatuur. Als hiervoor wordt gecorrigeerd, valt de curve vrijwel samen met die op $t = 93$ d. Dit ondanks grote verschillen in droge stofgehalten, namelijk gemiddeld 67 % op $t = 35$ d en 93 % op $t = 93$ d. Gezien de afname van het vochtgehalte is het aannemelijk dat de verdamping in de loop van de tijd ook is afgenomen. Daarom mag worden geconcludeerd dat het warmteprofiel primair wordt bepaald door geleiding en dat het verbruik voor verdamping een kleinere rol speelt. De laagste temperaturen worden gemeten op $t = 65$ d, de gemiddelde temperatuur is dan 3 °C lager dan op $t = 93$ d. Indien dit verschil geheel zou worden toegeschreven aan een afname van de verdamping, is de bijdrage van dit proces nog beperkt.

In figuur 6 wordt de normale meting vergeleken met een meting waarbij de ruimte langs de wand van de emmer, ontstaan door krimp van de specie, is opgevuld met glaswol. Onderin stijgt de temperatuur dan met bijna 4 °C. Bij een watertemperatuur die $1,3$ °C hoger is en een wat hogere luchttemperatuur resteert een netto-effect van circa 2 °C. Omdat het grootste deel van het uitwisselend oppervlak - de specie zelf - gelijk blijft, is het effect bovenin niet meetbaar. Dit resultaat illustreert dat warmteverliezen door convectie van lucht in krimpscheuren meetbare effecten kan hebben in de baggerspecie, alhoewel de invloed op de temperatuur van de volledige specielaag beperkt is.

Het profiel van de referentie illustreert niet alleen het effect van de verwarming, maar ook weer het beperkte effect van warmteverbruik door verdamping. De specieteratuur is onderin gelijk aan de omgevingstemperatuur en neemt naar boven af met in totaal $0,9$ °C. Het is aannemelijk dat deze afname een gevolg is van verdamping van water, die bovenin maximaal zal zijn.

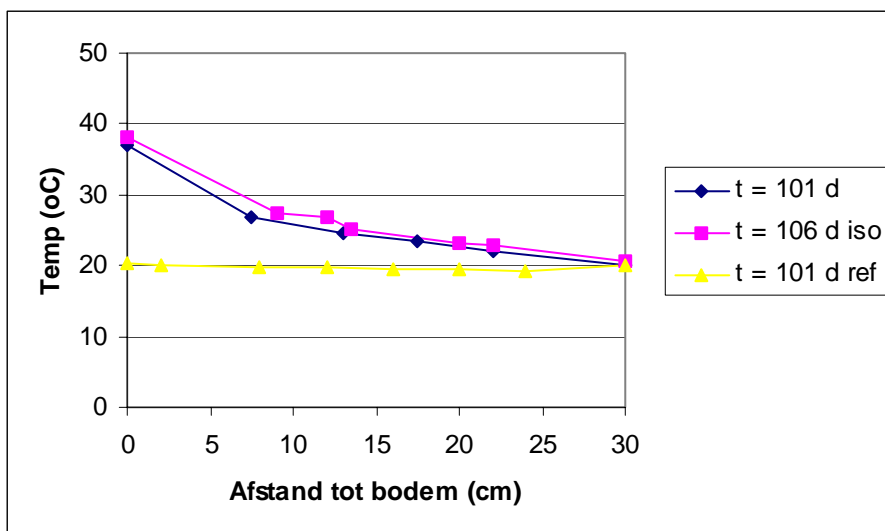


Fig. 6. Verloop van de temperatuur als functie van de laaghoogte bij droging van Belfeld-slib. Laaghoogte begin 30 cm, eind 22 cm. De waarde op de linker Y-as is de watertemperatuur, de waarde op de rechter Y-as is de luchttemperatuur. Iso is de meting na het opvullen van krimp scheuren met glaswol; ref. is de referentie (geen verwarming).

Samenvatting en perspectief

Onder laboratoriumcondities wordt de droging van slib met een factor 1,6 versneld door verwarming met water met een temperatuur van circa 40 °C vanaf de onderzijde. Onder veldcondities is het effect van verwarming (in verhouding tot de situatie waarin niet wordt verwarmd) mogelijk groter. Limiterend voor de droging is het opwaartse transport van water. De temperatuur van het slib neemt relatief sterk af met de hoogte van het slibbed. De proefresultaten wijzen erop dat warmteverliezen door geleiding de belangrijkste verklaring vormen voor het temperatuurprofiel en dat verdamping een minder grote rol speelt. Door modelberekeningen (zie hoofdstuk 5) moet een en ander worden onderbouwd.

Zowel het temperatuur- als het droge stofprofiel wijzen erop dat een maximaal effect van verwarming is te verkrijgen als het depot regelmatig wordt omgezet.

Uit de proef blijkt dat het temperatuurprofiel gedurende de rijping niet sterk verandert, ondanks grote verschillen in vochtgehalte en daarmee verdamping. Gelijktijdige veranderingen in vochtgehalte (<), dichtheid (>) en verdamping (<) hebben mogelijk compenserende effecten (b.v. verdamping minder én warmtegeleiding minder) ofwel de bijdrage van de verdamping is niet groot. Een en ander moet door modelberekeningen nader worden onderbouwd. Overigens moeten de weersinvloeden bij het werken op praktijkschaal nadrukkelijk worden meegenomen.

4.3.4 *Bepaling van de warmteparameters*

Inleiding

Om (model)berekeningen te kunnen uitvoeren aan de opwarming van een depot met baggerspecie moeten enkele fundamentele parameters bekend zijn, met name de warmtecapaciteit C_p (de hoeveelheid warmte die nodig is om 1 kg van een stof 1 Kelvin in temperatuur te doen stijgen; eenheid J/kg,K) en de warmtegeleidingscoëfficiënt λ (de hoeveelheid warmte die door een 1 m dikke laag van een stof zal gaan, bij een oppervlak van 1 m² en een temperatuurverschil van 1 K; eenheid W/m,K). Dergelijke grootheden zijn voor baggerspecie niet bekend. Er moet verder ook rekening mee worden gehouden dat de samenstelling van baggerspecie wisselend is, zowel per partij als tijdens het drogen, waarbij immers het watergehalte daalt.

Baggerspecie bestaat in een wisselende verhouding uit een aantal bestanddelen, die verschillen qua warmtecapaciteit. Hierbij gaat het om de minerale componenten zand en klei, organische stof en water. Van deze afzonderlijke componenten is de warmtecapaciteit bekend [15], zodat de totale warmtecapaciteit van een bepaalde baggerspecie kan worden berekend. Hierbij moet wel rekening worden gehouden met een zekere onnauwkeurigheid, omdat er binnen de groepen minerale componenten en organische stof variaties zijn, bijvoorbeeld zand heeft een warmtecapaciteit die circa 10 % lager is dan die van klei. Op basis van berekeningen zal echter een redelijke benadering worden verkregen, die zal worden vergeleken met het resultaat van bepalingen.

De warmtegeleidingscoëfficiënt is niet eenvoudig te berekenen en is daarom experimenteel bepaald.

Hierna worden de resultaten van de bepalingen en berekeningen samengevat. Voor een volledige beschrijving wordt verwezen naar bijlage A.

Warmtecapaciteit

Berekening

De warmtecapaciteit van grond is opgebouwd uit de warmtecapaciteiten van organische stof, minerale delen en bodemvocht. De warmtecapaciteit van bodemlucht is zo gering dat deze veelal wordt verwaarloosd. Wat betreft warmtegeleiding is lucht echter wel van belang, vanwege de isolerende werking van lucht. De warmtecapaciteiten, die zijn gevonden in de literatuur [15] zijn:

- organische stof: 2,7 MJ/(m³,K);
- minerale delen: 1,9 MJ/(m³,K);
- bodemvocht: 4,2 MJ/(m³,K).

De warmtecapaciteit van grond of baggerspecie kan dan als volgt worden benaderd:

$$C_t = (2,7 \theta_h + 1,9 \theta_m + 4,2 \theta)$$

Install Equation Editor and don

waarin:

- C_t is de warmtecapaciteit van grond/baggerspecie (MJ/(m³,K));
- θ_h is de volumefractie van organische stof;
- θ_m is de volumefractie van minerale delen;
- θ is de volumefractie van vocht.

De resultaten van de berekening en de laboratoriumbepaling zijn samengevat in tabel 7. Zowel de berekening als de bepaling leiden voor verse specie tot C_p -waarden van rond de 3 kJ/kg,K. Voor de drogere specie worden lagere waarden gevonden, hetgeen volgens verwachting is aangezien water het bestanddeel is met de hoogste warmtecapaciteit. De verschillen tussen berekende waarden en gemeten waarden liggen binnen een marge van circa 5%, een (on)nauwkeurigheid die zowel voor de berekening als de bepaling mag worden verwacht (zie onder "Inleiding" van deze paragraaf en bijlage A). Uit de resultaten kan daarom niet worden afgeleid dat één van de methoden beter kan zijn. Qua uitvoering is de berekening eenvoudiger, zodat deze methode de voorkeur verdient.

Tabel 7. Warmtecapaciteit van baggerspecie; C_p -waarden in $J/(kg,K)$ ¹⁾.

droge stofgehalte van specie	C_p specie berekend	C_p specie volgens uitkomst proef
55,3 %	3044	3158
68,2 %	2676	2803

¹⁾ Volledige gegevens in bijlage A.

Warmtegeleiding

De resultaten van de bepaling van de warmtegeleidingscoëfficiënt zijn samengevat in tabel 8.

Tabel 8. Specie-eigenschappen en resultaten van de berekening van de warmtegeleidingscoëfficiënt.

	droge stof (%)	organische stof (% van ds)	C_p ($J/kg,K$)	ρ (kg/m^3)	λ ($J/s,m,K$)
specie 1	56	8	2944	1762	1,5
specie 2	61,5	10	2798	1670	1,3

De waarden die voor de warmtegeleidingscoëfficiënt zijn gevonden komen qua orde van grootte goed overeen met de in [15] gepresenteerde waarden voor klei en zavel met vergelijkbare vochtgehalten. Uit [15] blijkt dat de warmtegeleidingscoëfficiënt toeneemt bij een toename van het vochtgehalte én bij een toename van de dichtheid. Voorts zijn er verschillen per grondsoort; de warmtegeleidingscoëfficiënt van zavel neemt relatief sneller toe met een stijging van het vochtgehalte dan die van klei.

Uit tabel 8 blijkt dat specie 2, met een wat lager vochtgehalte en een wat lagere dichtheid dan specie 1, ook een lagere warmtegeleidingscoëfficiënt heeft. Dit is conform de verwachting. Verder kunnen de verschillen in de macrosamenstelling nog een bijdrage leveren; specie 2 bevat wat meer organische stof en kalk en wat minder lutum en silt dan specie 1.

HOOFDSTUK 5

WARMTEBEREKENINGEN

5.1 Inleiding

Voor een beoordeling van de haalbaarheid van de versnelde rijping is het noodzakelijk om inzicht te hebben in de volgende aspecten:

1. de warmtevraag: wat is de normale depottemperatuur en hoe fluctueert deze over het jaar, wat is de optimale depottemperatuur;
2. het warmteaanbod: wat is de temperatuur van het koelwater en hoe fluctueert deze over het jaar, wat is het debiet, zijn er verschillen per centrale, zijn er mogelijkheden om de koelwater-temperatuur te sturen;
3. wat is, bij de verschillende omstandigheden, de effectieve temperatuuroename die in een depot te bereiken is met het gebruik van koelwater. Hiervoor zijn modelberekeningen vereist.

De genoemde aspecten worden in de navolgende paragrafen besproken.

5.2 Warmtevraag

Eerst wordt stilgestaan bij de uitgangssituatie: de depottemperatuur in situaties zonder verwarming. Hiervan zijn geen meetgegevens bekend en daarom wordt uitgegaan van metingen van het KNMI aan de bodemtemperatuur op verschillende diepten. Deze temperatuur kan wat verschillen van de depottemperatuur maar zal toch een goede indruk geven. In figuur 7 zijn de bodemtemperaturen op verschillende hoogten uitgezet als maandgemiddelden van het jaar 1997. De gegevens zijn afkomstig van het meetstation De Bilt. De temperaturen in De Bilt wijken weinig af van de temperaturen in Maastricht. De bodemtemperatuur daalt met de geografische hoogte, terwijl ook de ligging ten opzichte van de zee invloed heeft: de jaargemiddelden op 50 cm diepte van Wilhelminadorp (Zeeland), De Bilt en Nieuw-Beerta (Groningen) zijn respectievelijk 11,8, 11,3 en 10,2 °C.

Fig. 7. Maandgemiddelde bodemtemperatuur op verschillende diepten, in cm beneden het maaiveld. Meetstation De Bilt, 1997. Bron: KNMI.

Uit de gegevens kan worden afgeleid met hoeveel graden de temperatuur moet stijgen om een gewenste waarde te bereiken. Hierbij kunnen twee scenario's worden onderscheiden:

- a. Op basis van de slurryproeven moet een temperatuur van circa 30 °C worden nagestreefd.
- b. Op basis van monitoring van praktijkdepots is een constante temperatuur van circa 15 °C voldoende om een verdubbeling van de depotcapaciteit te verkrijgen. Dit wordt als volgt onderbouwd: de (chemische) rijping blijkt zich vrijwel volledig in de zomerperiode (april t/m september) af te spelen en de bodemtemperatuur is dan gemiddeld circa 15 °C. Blijkbaar is deze temperatuur voldoende om in zes maanden tijd een afbraak van minerale olie van gemiddeld circa 50 % te verkrijgen en ook andere chemische rijpingsreacties grotendeels te laten verlopen [5].

De discrepantie tussen scenario a en senario b kan ofwel een gevolg zijn van de variaties in speciekwaliteit ofwel van verschillen tussen de situatie in het laboratorium en de praktijk. Vooralsnog is het zinvol om beide mogelijkheden mee te nemen in de beschouwingen.

5.3 Warmteaanbod

De mogelijkheden voor benutting van restwarmte van centrales zijn uitgebreid beschreven in bijlage B. De volgende factoren spelen een rol:

- a. Geografische ligging: centrales zijn verspreid over heel Nederland aanwezig en liggen meestal aan grotere wateren (rivieren, IJsselmeer, zee), hetgeen gunstig is voor de aanvoer van baggerspecie.
- b. Huidige benutting van restwarmte: bij de meeste centrales wordt de restwarmte nog niet nuttig ingezet en wordt het 'weggekoeld' naar het oppervlaktewater of de lucht (koeltorens).
- c. Bedrijfsvoering van centrales: sommige centrales zijn continu in bedrijf, andere alleen in de piekuren. Wat betreft deze laatste categorie moet nader worden bekeken of bij discontinue toevoer van warm water voldoende temperatuurstijging wordt verkregen.
- d. Wijze van koelen: er is onderscheid tussen directe koeling met oppervlaktewater, koeling via een koeltoren en een mengvorm. In verband met de lozingsvergunningen, die een maximale opwarming van 7 °C voorschrijven, zal het te lozen koelwater een lagere temperatuur hebben dan het water in een koeltorencircuit. De temperatuur van dit water varieert tussen 20 en 40 °C. In figuur 8 is het temperatuurverloop van het ingenomen rivierwater en het geloosde koelwater uitgezet. Op momenten dat de temperatuur bij directe koeling te hoog oploopt, wordt de koeltoren ingezet. Uit de temperatuurpieken in die perioden kan globaal worden afgeleid wat het temperatuurverloop is van het koelwater dat de koeltoren ingaat. Dit koelwater, dat een maximale temperatuur vertegenwoordigt, heeft de volgende gemiddelde temperaturen:
 - winterperiode (oktober t/m maart): circa 20°C;
 - zomerperiode (april t/m september): circa 30 °C.

Voor centrales zonder koeltoren worden de gemiddelde temperaturen van het koelwater als volgt ingeschat:

- winterperiode (oktober t/m maart): circa 15 °C;
- zomerperiode (april t/m september): circa 24 °C.

In algemene zin is duidelijk dat de koelwatertemperatuur de omgevingstemperatuur volgt, zodat de temperaturen in de winter relatief laag zijn en in de zomer relatief hoog. Dit is ongunstig, omdat de warmtevraag in de winter het hoogst is.

Fig. 8. Temperatuurverloop van het ingenomen en te lozen koelwater en effecten van een koeltorenbedrijf. Bron: EPZ.

Naast de directe inzet van de warmte in koelwater, die geen economische waarde vertegenwoordigt, is het mogelijk om meer hoogwaardige energie te benutten. Hiervoor zijn verschillende opties:

- a. Het is mogelijk om lagedrukstoom te benutten om een deelstroom van het koelwater verder op te warmen. Hiervoor zal de centrale kosten in rekening brengen van f 5,- à f 6,- per ton stoom.
- b. Het optimaliseren van (nieuwe) warmtekrachtcentrales op de warmtevraag van het rijpingsproces.
- c. Het gebruik van warmtepompen.

In het algemeen geldt dat het gebruik van meer hoogwaardige energie met hogere kosten gepaard gaat. In hoeverre dergelijke opties economisch haalbaar zijn, is momenteel niet goed te beoordelen. Duidelijk is echter dat het warmteaanbod niet beperkt hoeft te blijven tot het directe gebruik van koelwater.

5.4 Vergelijking warmtevraag en warmteaanbod

De warmtevraag is uiteraard afhankelijk van de gewenste condities in het depot. Er worden twee scenario's beschouwd:

1. Zomercondities het gehele jaar handhaven. De jaargemiddelde temperatuur moet dan $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ zijn. Dit betekent dat in de winterperiode de temperatuur met gemiddeld $7,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ moet stijgen. Het koelwater heeft dan in de meest gunstige situatie een temperatuur van circa $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. In hoeverre dit voldoende is om het slib te verwarmen, moet blijken uit modelberekeningen.
2. Gedurende het hele jaar een temperatuur van circa $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ handhaven. In de zomerperiode is dan een opwarming met circa $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ nodig en in de winterperiode moet de gemiddelde temperatuur van de specie met $22,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ worden verhoogd.

5.5 Warmteberekeningen

5.5.1 *Uitgangspunten*

Voor het uitvoeren van warmteberekeningen moet er duidelijkheid zijn over vraag en aanbod van warmte (zie 5.2 en 5.3), de opbouw van het depot, de warmtevragende processen en de warmteverliezen en tenslotte moeten de fundamentele warmteparameters van het materiaal bekend zijn. Deze aspecten worden kort besproken.

Opbouw van het depot

Gezien de vorm waarin de restwarmte beschikbaar is, de technische beperkingen bij het vullen en leegmaken van het depot en de eis dat water via de bovenzijde moet kunnen verdampen, ligt verwarming vanaf de onderzijde van het depot voor de hand. Andere technieken zijn niet uitvoerbaar of zullen tot hoge meerkosten leiden. Gebruik van hete lucht vereist bijvoorbeeld een vorm van overkapping van de (omvangrijke) depots.

In het algemeen worden depots gedraineerd. Deze drains worden aangebracht in een laag zand van 50 cm, waarop de specie wordt gestort. In deze laag drainzand is voldoende ruimte voor het aanbrengen van verwarmingsbuizen. Een eenvoudiger en wellicht goedkoper alternatief is om het warme water via een dubbele laag folie, opgevuld met zand, onderdoor het depot te laten stromen. Dit is constructief eenvoudiger dan een stelsel van buizen, terwijl het uitwisselend oppervlak groter is. Ter bescherming van de folie zal wel een laag zand moeten worden aangebracht, waarin de drainage kan worden aangebracht. De normale dikte van de zandlaag van 50 cm heeft duidelijke nadelen uit oogpunt van warmteverliezen. Daarom is voor de berekeningen uitgegaan van een zandlaag van 12 cm, met daarbovenop stelconplaten (gewapend beton, dikte 12 cm). Deze platen worden gelegd in banen met tussenruimten, zodat de mogelijkheid voor drainage blijft bestaan. Mogelijk moet onder het depot een belastingspreidende laag worden aangebracht. Er wordt uitgegaan van de normale slibhoogte van 1 m.

Warmtevragende processen en warmteverliezen

De warmtevraag is te splitsen in drie posten:

1. initiële opwarming van de specie tot de gewenste temperatuur;
2. warmte die nodig is voor de verdamping van water;
3. warmte die nodig is om verliezen naar de omgeving te compenseren.

Voor alle posten geldt dat er een duidelijke afhankelijkheid is van de weersomstandigheden en het seizoen. In dit kader worden de weers- en seizoensinvloeden sterk geschematiseerd tot gemiddelde bodemtemperaturen in winter (oktober t/m maart) en zomer (april t/m september). Voor de luchttemperaturen en de neerslaggegevens geldt hetzelfde. De energie die nodig is voor de verdamping van water is moeilijk in te schatten. Naast het natuurlijke verdampingoverschot in de zomer en het neerslagoverschot in de winter zou bekend moeten zijn welk deel van het al aanwezige of toegevoerde vocht verdwijnt door drainage of afstroming. Dit is voor de onderhavige situatie onduidelijk.

Er worden de volgende aannamen gedaan:

1. De specie heeft bij aanvang een dichtheid van 1200 kg/m^3 en bevat 50 % vocht. Het vochtgehalte moet worden teruggebracht naar 25 %. Dit betekent dat aan het eind van de rijping nog 200 kg vocht/m^3 aanwezig is, zodat 400 kg vocht verwijderd moet zijn (door drainage en verdamping). Dit komt overeen met 400 mm.

2. In de zomerperiode geldt gemiddeld een verdampingsoverschot van ruim 50 mm, terwijl verder een deel van het vocht door drainage kan worden afgevoerd. Op basis van praktijk-waarnemingen [5] is het niet waarschijnlijk dat 400 mm vocht uitsluitend door natuurlijke verdamping en drainage wordt verwijderd. Als *indicatie* wordt uitgegaan van een geforceerde verdamping van 200 mm (hiervoor moet dus extra energie worden aangevoerd).
3. In de winterperiode geldt een neerslagoverschot van 300 - 350 mm, hetgeen extra moet worden afgevoerd. Deels kan dit via greppels en drainage, als *indicatie* wordt aangenomen dat bovenop de 400 mm uit de baggerspecie nog 150 mm extra moet worden verdampt.

De warmtevraag als gevolg van verliezen wordt hierna besproken.

Warmteverliezen

Verlies zal met name optreden door warmtetransport naar de omgeving door geleiding en mogelijk ook door convectie van water of lucht. Convectie van water is denkbaar (drainage, oppervlakkige afstroming) maar de hoeveelheid water en daarmee warmte, die op deze wijze wordt afgevoerd, is zodanig beperkt dat convectie van water geen belangrijke bijdrage kan leveren aan warmteverliezen. Convectie door stroming van lucht in het materiaal is denkbaar, met name als scheurvorming is opgetreden, maar zolang er niet (geforceerd) lucht door het materiaal wordt geleid, zal deze bijdrage beperkt zijn door de combinatie van een geringe warmtecapaciteit van lucht en een geringe luchtstroming door het materiaal. De beschouwing van warmteverliezen beperkt zich daarom tot geleiding van warmte uit het depot. Verliezen tijdens het transport van het warme water door de bodem worden niet meegenomen. Dit is alleen terecht indien het depot dichtbij het leveringspunt kan worden gesitueerd.

Door geleiding wordt de warmte alzijdig afgegeven. In dit kader worden verliezen via de zijkanten en de onderzijde van het depot niet meegenomen. Zolang de beschikbare hoeveelheid warm water niet limiterend is (direct gebruikt van koelwater), kan het verlies via de onderzijde grotendeels worden gecompenseerd door meer water door te pompen. Indien de hoeveelheid warm water wel limiterend is (koelwater moet worden opgewarmd), is het gewenst om de onderzijde van het depot te isoleren, bijvoorbeeld met polystyreen. Verlies via de zijkant zal resulteren in lagere temperaturen in de buitenste 1 - 2 m van het depot, maar op het gehele volume kunnen deze effecten worden verwaarloosd [16] (bij een veldproef met een klein depot gaat dit niet op).

Warmteparameters

Zoals is besproken in 4.3.4, zijn de warmtecapaciteit en de warmtegeleidingscoëfficiënt van de specie bepaald. Deze grootheden zullen echter gedurende de rijping veranderen. Correctie van de warmtecapaciteit is eenvoudig via berekeningen uit te voeren. Voor de warmtegeleidingscoëfficiënt wordt uitgegaan van de navolgende grafiek (zie fig. 9). Voor de afgebeelde grondsoorten daalt de coëfficiënt bij afname van het vochtgehalte van 50 % naar 25 % met 30 tot 45 %. Als de dichtheid toeneemt met 30 % - een waarde die bij rijping verwacht mag worden - neemt de coëfficiënt toe met circa 40 %. Dit betekent dat het effect van een afnemend vochtgehalte min of meer wordt gecompenseerd door een toename van de dichtheid. Voor een eerste, grove(!) benadering wordt de warmtegeleidingscoëfficiënt daarom constant verondersteld.

Bij de berekeningen is uitgegaan van de volgende waarden:

- warmtecapaciteit: bij aanvang 3200 kJ/ton,K; aan het eind ($d_s = 75\%$) 2430 kJ/ton,K;
- warmtegeleidingscoëfficiënt: 1,2 W/m,K.

Fig. 9. Warmtegeleidingscoëfficiënt van klei en zavel in afhankelijkheid van het vochtgehalte (volumefractie, θ) en de dichtheid.

5.5.2 Orde van grootte van de warmtevraag

De orde van grootte van de warmtevraag kan op basis van de voorgaande uitgangspunten (zie 5.5.1) worden berekend. De resultaten zijn samengevat in tabel 9. Hoewel de getallen als indicatief moeten worden opgevat, is wel duidelijk dat de benodigde warmte voor de initiële opwarming gering is ten opzichte van de warmtebehoefte voor verdamping en het instandhouden van de specietemperatuur. De benodigde warmte voor verdamping en compensatie van geleidingsverliezen is qua orde van grootte vergelijkbaar; alleen in het geval van de variant 15 °C/winter is de verdampingsterm beduidend groter.

Tabel 9. Indicatieve warmtebehoefte voor het opwarmen, verdampen en instandhouden van de temperatuur (geleidingsverliezen). Zie voor uitgangspunten 5.5.1. Waarden in MJ/m² depotoppervlak; dikte van de specielaag bij aanvang is 1 m.

specietemperatuur en seizoen	initiële opwarming	verdamping van water	geleidingsverliezen
15 °C, zomer	0	≥ 0	0
15 °C, winter	29	1240	314
30 °C, zomer	58	450	515
30 °C, winter	85	1240	836

5.5.3 Specietemperatuur bij directe inzet van koelwater

Met behulp van een in opdracht van Tauw ontwikkeld computermodel [16] kan de gemiddelde specietemperatuur worden berekend. Het model en de uitgangspunten zijn in bijlage C beschreven. In deze berekeningen is uitgegaan van een constante temperatuur onderin het depot die gelijk is aan de koelwatertemperatuur en een gemiddelde luchttemperatuur die geldt voor het winter- respectievelijk het zomerseizoen (zie tabel 10). Er is *geen* rekening gehouden met de warmtebehoefte voor verdamping, hetgeen inhoudt dat de werkelijke temperaturen lager zullen zijn dan de berekende. Het gaat hier echter alleen om een eerste beoordeling van de mogelijkheden om koelwater direct in te zetten.

Tabel 10. Specietemperaturen bij continue toevoer van koelwater aan de onderzijde van het depot, bij verschillende temperaturen en seizoenen. Modelberekeningen van de effecten van warmtegeleiding, verdamping zijn niet meegenomen.

koelwatertemperatuur (°C)	specietemperatuur zomer (°C)	specietemperatuur winter (°C)
<i>koeltorenbedrijf</i> zomer 30/winter 20	21,5	11,7
<i>directe lozing</i> zomer 24/winter 15	18,7	9,5

Uit tabel 10 blijkt dat bij directe inzet van koelwater in beide scenario's de temperatuurstijging in de winter onvoldoende is om 'zomercondities' (15 °C) te bereiken. Aangezien de warmtebehoefte voor verdamping in de winterperiode nog hoger is dan de compensatie voor geleidingsverliezen, zal er in de praktijk slechts een zeer geringe opwarming worden bereikt.

Geconcludeerd wordt dat de directe inzet van koelwater in de winterperiode onvoldoende perspectief biedt. In de zomerperiode is het perspectief dat, met name bij koeltorenbedrijf, extra verdampingscapaciteit wordt gecreëerd. Hierdoor ontstaat meer zekerheid dat specie in 1 jaar kan worden gerijpt, ook in het geval van relatief natte of koude zomerperiodes. Het is echter duidelijk dat voor een beduidende toename van de depotcapaciteit het koelwater extra zal moeten worden verwarmd.

5.5.4 Specietemperatuur bij gebruik van verwarmd koelwater

In eerste instantie wordt gekeken naar de maximale haalbare verwarming door gebruik te maken van koelwater dat is opgewarmd tot 60 °C. Hogere temperaturen zullen leiden tot het afsterven van de micro-organismen, terwijl ook met de folie problemen zullen ontstaan.

Bij een constante watertemperatuur van 60 °C is de gemiddelde specietemperatuur, afgezien van verdamping, in de zomer 35 °C en in de winter 30 °C. Doordat een groot deel van de toegevoerde energie in verdamping gaat zitten, is de werkelijke temperatuur aanzienlijk lager. Aangezien de verdamping niet gelijkmatig over de specielaag verloopt (onderin weinig, bovenin veel), is het niet eenvoudig om aan te geven wat het effect zal worden op de gemiddelde specietemperatuur. Qua orde van grootte zal deze echter globaal 10 °C lager zijn dan de berekende temperatuur. Dit houdt in dat een gemiddelde specietemperatuur van 30 °C (zie scenario a uit 5.2) naar verwachting niet haalbaar is. Een verdubbeling van de depotcapaciteit op basis van een constante temperatuur van 15 °C is mogelijk wel haalbaar. Hierbij zal de zomertemperatuur hoger zijn dan 15 °C en de wintertemperatuur (mogelijk) lager zijn dan 15 °C.

HOOFDSTUK 6

VELDPROEF

In dit hoofdstuk wordt de veldproef beschreven. Na een beschrijving van de aandachtspunten en de gebruikte materialen en methoden, worden de resultaten aan de orde gesteld. Hierbij wordt onder meer stilgestaan bij de weersomstandigheden, de rijping van de specie en de toetsing van het verkregen product aan het Bouwstoffenbesluit [4].

6.1 Aandachtspunten

Uit het laboratoriumonderzoek blijkt dat de rijping van baggerspecie is te versnellen door de temperatuur te verhogen. Dit wordt bevestigd door de monitoring van praktijkdepots, waaruit blijkt dat de rijping hoofdzakelijk in de zomerperiode (gemiddelde temperatuur 15 °C) plaatsvindt.

Het uitvoeren van een veldproef is een noodzakelijke stap in de beoordeling van de haalbaarheid, omdat de laboratoriumcondities in een aantal opzichten duidelijk afwijken van de praktijk. De ontwatering van de baggerspecie is een essentiële stap in het rijpingsproces, waarbij sprake is van verschillende processen (oppervlakkige afvoer, drainage en verdamping). Deze processen worden beïnvloed door het ontwerp van het depot, het beheer en met name de weersgesteldheid. Daarnaast moet rekening worden gehouden met schaafeffecten. De doelstellingen van de veldproef zijn daarom om de volgende aspecten te kwantificeren:

1. Effecten van opschaling. De totale hoeveelheid specie is per proefvak een factor 100 groter en de laagdikte is in de veldproef een factor 2,3 groter dan in het laboratorium.
2. Effecten van veldcondities, vooral het weer. Het is duidelijk dat de weersomstandigheden in het veld sterk afwijken van de laboratoriumcondities. Dit geldt zowel voor de temperatuur(schommelingen), de relatieve vochtigheid, de wind als de regenval.
3. Opstellen van een vochtbalans. Concreet gaat het om de verhouding tussen vocht dat oppervlakkig plus via drains kan worden afgevoerd versus de verdamping. Indien er veel water moet worden verdampt, kan de energievraag toenemen met een factor 2 - 5 (zomer - winter) ten opzichte van de hoeveelheid warmte die nodig is om de gewenste temperatuur te handhaven (ter compensatie van verliezen naar de omgeving).

Verder is het gewenst om de optimale temperatuur onder veldcondities te verifiëren. Afwijkingen van het laboratorium zijn bijvoorbeeld mogelijk als door gradiënten over de specielaag, bij een *gemiddeld* optimale temperatuur, onderin of bovenin suboptimale condities ontstaan (te hoge temperatuur onderin, te sterke uitdroging bovenin).

6.2 Materialen en methoden

6.2.1 *Monsterneming van de baggerspecie*

Er is baggerspecie bemonsterd uit het toeleidingskanaal naar het sluizencomplex in de Maas bij Belfeld (Limburg), aan de westelijke zijde. Dergelijke specie is ook gebruikt in het laboratoriumonderzoek. Door sedimentatie en opwerveling kan de speciekwaliteit in de tussentijd wel zijn veranderd. De monsterneming is uitgevoerd met een kraanschip van de firma Kauffeld op 7 januari 1999.

6.2.2 *Proefdepot*

Het proefdepot is opgebouwd als een rechthoek van betonnen elementen, behalve één van de korte zijden, die uit een dijkje van zand bestaat. De elementen zijn geplaatst op de aanwezige betonnen vloer. Binnen de rechthoek zijn drie compartimenten aangelegd met een oppervlak van 2 bij 1 m, het referentiecompartiment is echter wat groter omdat één zijde schuin is. De comparti-

menten zijn van elkaar gescheiden door tussenwanden van 0,6 m dik, bestaande uit multiplex, opgevuld met gecomposteerd slib. Op deze wijze is een goede isolatie verkregen. Elk van de compartimenten is als volgt ingericht:

- a. Op de betonnen vloer is een laag zand aangebracht.
- b. Vervolgens is het hele compartiment afgedicht met vijverfolie.
- c. Op de folie is een laag drainzand aangebracht van circa 0,4 m, met daarin in de lengterichting een drain. Hierop is een PVC-buis aangesloten die door de sliblaag heensteekt. Op deze wijze kan water uit de drainlaag worden afgepompt.
- d. Op het drainzand is een laag baggerspecie aangebracht van 0,7 m dik (excl. bovenstaand water). De oorspronkelijke opzet was om een laag slib van 1 m aan te brengen, maar er bleek onvoldoende slib te zijn aangeleverd.
- e. In de compartimenten 2 en 3 zijn verwarmingsdraden met een lengte van 100 respectievelijk 200 m aangebracht in de drainzandlaag. De afstand van de draden tot het grensvlak met de specie is circa 10 cm. De draden zijn verder gelijkmatig verdeeld in het drainzand. Het opgenomen vermogen van de verwarming bedraagt volgens de fabrikant 1,75 respectievelijk 3,5 kWh. Het gemeten opgenomen vermogen ligt circa 20 % lager. De verwarming wordt geregeld via een sensor, die zich halverwege de sliblaag bevindt, en een regelunit, waarmee de gewenste temperatuur wordt ingesteld.
- f. In alle compartimenten bevinden zich middenin het depot, halverwege de sliblaag, temperatuurloggers, die elke 30 minuten de gemeten temperatuur opslaan. In de verwarmde depots zijn tevens onderin (5 cm boven de zandlaag) en bovenin (5 cm onder het oppervlak) temperatuurloggers aanwezig. De temperatuurloggers bevonden zich onderin plastic buisjes, die eerst in open verbinding stonden met de atmosfeer. Omdat werd vermoed dat via dit contact met de atmosfeer afwijkingen ontstonden in de temperaturen, zijn de buisjes in juni gevuld met zand. Gezien afwijkingen met directe temperatuurmetingen, zijn de buisjes begin september tevens afgesloten met folie.
- g. Het stroomverbruik wordt per compartiment geregistreerd door middel van kWh-meters.
- h. In alle compartimenten bevinden zich peilschalen, waarmee de inklinking van de sliblaag kan worden gevolgd.

De compartimenten zijn met een kraan gevuld in week 4. Hierbij is het in de container aanwezige slib tevoren zo goed mogelijk gemengd.

6.2.3 *Bedrijfsvoering*

Waterhuishouding

Er is zoveel mogelijk aangesloten bij de gangbare bedrijfsvoering van rijpingsdepots. In de praktijk kan water oppervlakkig afstromen (aanvankelijk via slibkisten, later via greppels) en ook via drains. Voor zover aanwezig is het water in de proefvakken aan de oppervlakte en in de drains (plus de drainzandlaag) eenmaal per 2 weken afgepompt.

Temperatuur

De opzet was om de gemiddelde temperatuur in de compartimenten 2 en 3 te handhaven op 5 °C respectievelijk 10 °C boven de maandgemiddelde bodemtemperatuur in de Bilt op een diepte van 50 cm¹. De beoogde en de gerealiseerde temperaturen zijn weergegeven in tabel 11.

¹ Het betreft gegevens uit 1997. De gemiddelde temperatuur is in dat jaar 0,9 °C warmer dan het langjarig gemiddelde. Temperaturen op 50 cm diepte verschillen maximaal 2 °C van de (maandgemiddelde) temperatuur op 20 cm diepte. In de winter is het bovenin kouder, in de zomer warmer.

In het algemeen zijn de beoogde waarden goed benaderd. Afwijkende waarden zijn met name het gevolg van problemen met de temperatuurregeling (defecten, onjuiste weergave). Als gevolg hiervan is bij aanvang van de proef in beide compartimenten en in augustus in bak 3 de temperatuur sterk verhoogd, gedurende perioden van maximaal 2 weken. De sterke opwarming heeft niet geleid tot merkbare remming van afbraakprocessen of iets dergelijks. In juli is de verwarming in beide vakken uitgevallen, waardoor de temperatuur is gedaald.

Tabel 11. Beoogde en gerealiseerde maandgemiddelde temperaturen (halverwege de sliblaag).

maand	vak 1 (referentie)		vak 2 (temp. ca. 5 °C verhoogd)			vak 3 (temp. ca. 10 °C verhoogd)		
	praktijk		beoogd	gerealiseerd		beoogd	gerealiseerd	
	direct	logger		direct	logger		direct	logger
februari	5,6	2,5	10	43,2	29,5	15	42,9	29,1
maart	8,1	7,7	13	17,0	17,5	18	18,1	16,4
april	11,7	11,6	14	18,4	18,3	19	22,5	18,1
mei	14,7	17,0	18	19,5	20,3	23	22,5	21,6
juni	19,6	19,4	21	22,0	22,8	26	25,7	21,5
juli	22,3	21,3	23	23,2	22,7	28	24,9	20,5
augustus	19,3	20,7	23	21,9	22,5	28	39,1	31,1
september	20,8*	20,8	22	23,6*	22,2	27	29,6*	27,3
oktober	12,0	13,2	19	21,6*	19,2	24	27,0	28,6

* Slechts een directe meting.

De ingestelde temperaturen zijn tweewekelijks gecontroleerd door middel van directe meting in de baggerspecie. Zo nodig is de regeling dan bijgesteld. Naast de beoogde waarden is ook gekeken naar de temperaturen in de referentiebak. Indien deze beduidend afweek van de maandgemiddelde bodemtemperatuur, zijn de temperaturen in de verwarmde bakken bijgesteld. Dit om de gewenste temperatuurverschillen tussen de bakken onderling (vak 2 circa 5 °C en vak 3 circa 10 °C warmer dan de referentie) te handhaven. De temperatuur in de referentiebak kan afwijken van de gebruikte literatuurwaarden als gevolg van de fluctuaties in het weer of een verhoogde ligging van het depot ten opzichte van de bodem. De sturing van de temperaturen is gebaseerd op directe metingen in de sliblaag. Pas bij de uitwerking van de loggegegevens eind augustus is gebleken dat er soms aanzienlijke afwijkingen zijn tussen de continue registratie en de handmatige metingen. Deze worden hierna besproken.

Vergelijking loggergemiddelde en directe metingen

Het loggergemiddelde is gebaseerd op zeer veel meetwaarden (ieder half uur), terwijl handmatig 2 tot 3 metingen per maand worden verricht. Het loggergemiddelde is in principe dus het meest betrouwbaar. Wanneer de temperatuur weinig fluctueert zal er desondanks een goede overeenkomst zijn tussen beide gemiddelden. Afgezien van de maand februari, waarin de temperatuur in de verwarmde vakken in korte tijd zeer sterk is opgelopen door een niet goed werkende regeling en er van de referentie slechts één meetwaarde beschikbaar is, is er wat betreft de vakken 1 en 2 veelal een goede overeenkomst tussen de directe meting en de loggerresultaten. In vak 3 zijn de directe metingen echter steeds hoger dan de loggergemiddelden. Uit vergelijking van beide metingen op dezelfde tijdstippen volgt dat ook dan de loggers lagere waarden aangeven. Er is daarom sprake van een systematisch verschil. Hiervoor zijn twee verklaringen mogelijk:

1. Afwijkingen in de apparatuur. Dit is blijkens controle achteraf niet het geval.
2. Afwijkingen als gevolg van de plaats van de meting. Bij de directe meting is een thermokoppel in de sliblaag gedrukt, de temperatuurloggers zijn in buisjes geplaatst (zie 6.2.2). Het is denkbaar dat door contact met de atmosfeer warmte is ontweken, waardoor de temperatuur in de buisjes te laag is. Dit geldt niet voor de referentie (die is in evenwicht met de atmosfeer) en in bak 2 is het verschil met de omgeving minder groot dan in bak 3. Het is dus mogelijk dat de temperatuur in bak 3 als gevolg van warmteverliezen is onderschat. Verder zou de diepte van

de handmatige meting kunnen afwijken van de diepte van de logger. Hiervoor zijn echter geen aanwijzingen en dan zou er systematisch te diep gemeten moeten zijn. Vooral nog wordt ervan uitgegaan dat de handmatige, directe metingen een beter beeld geven van de werkelijkheid dan de temperatuurloggers.

Vergelijking beoogde en gerealiseerde temperaturen

Voor de onderzoeksperiode tot en met juli geldt het volgende:

1. De temperatuur in de referentie is vanaf april hoger dan verwacht op basis van KNMI-metingen. Er moet nog worden nagegaan of dit komt omdat 1999 een relatief warm jaar is geweest of omdat de temperatuur in het depot, dat op de bodem ligt, systematisch is verhoogd ten opzichte van de bodemtemperatuur.
2. De temperatuur in vak 2 is meestal wat hoger dan beoogd terwijl de temperatuur in vak 3 (op basis van de directe metingen) meestal redelijk overeenkomt met de beoogde temperatuur, afgezien van de maanden februari en juli waarin technische problemen zijn opgetreden. De gemiddelde temperaturen zijn samengevat in tabel 12.

Tabel 12. Verwachte en gemeten temperaturen, gemiddelden over de maanden februari tot en met oktober ¹⁾.

	vak 1 (referentie)		vak 2		vak 3	
	verwacht	werkelijk	beoogd	werkelijk	beoogd	werkelijk
gemiddelde	13,6	15,6	18,6	21,2	23,6	25,3

¹⁾ De werkelijke gemiddelden zijn gebaseerd op de loggerwaarden, behalve vak 3 (directe metingen, februari, augustus, september en oktober zijn loggerwaarden). Voor alle vakken geldt dat februari als halve maand is gerekend.

Voor de onderlinge vergelijking van de vakken geldt dat de temperatuur in vak 2 gemiddeld 5,6 °C hoger is dan de temperatuur in de referentie (beoogd was 5 °C) en de temperatuur in vak 3 gemiddeld 9,7 °C (beoogd was 10 °C). Dit houdt in dat uit de onderlinge vergelijking van de vakken de effecten van verwarming kunnen worden afgeleid. De verschillen variëren overigens per maand aanzienlijk (zie hiervoor tabel 11).

6.2.4 Registratie, veldmetingen en monsterneming *Weersomstandigheden*

Voor de neerslag is gebruikt gemaakt van dagelijkse metingen op de naastgelegen RWZI. Tevens zijn gegevens opgevraagd van het dichtstbijgelegen KNMI-meetstation Deelen en van De Bilt, omdat bodemtemperaturen en sommige langjarige gemiddelden alleen van dit station bekend waren.

Hoogte van de sliblaag

De hoogte van de sliblaag is tweewekelijks bepaald via het aflezen van peilschalen.

Energieverbruik voor verwarming

Het energieverbruik voor verwarming is tweewekelijks bepaald via het aflezen van kWh-meters.

Temperatuur

De temperatuur wordt met sensoren en temperatuurloggers automatisch om de 30 minuten geregistreerd. De loggers worden om de 4 weken uitgelezen. Ter controle wordt de temperatuur op 5 cm diepte en in het midden tweewekelijks direct gemeten met een thermokoppel, in alle compartimenten.

Metingen van het drainwater

In het drainwater worden de pH, geleidbaarheid en redoxpotentiaal gemeten.

Overige waarnemingen

Het eventuele ontstaan van scheuren in de specie en de ontwikkeling van plantengroei worden geregistreerd.

Monsterneming

De monsterneming vindt plaats door verspreid over het gehele compartiment met een gutsboor 10 monsters te nemen. De gaten, die hierbij ontstaan, worden na afloop dichtgedrukt. De monsters worden gesplitst in drie lagen van gelijke dikte; per compartiment worden dus drie mengmonsters (onderlaag, middenlaag en bovenlaag) samengesteld.

6.2.5 *Laboratoriumonderzoek*

Uitgangsmateriaal

Per compartiment is een monster geanalyseerd op de volgende parameters: droogrest, gloeiverlies, oxideerbare organische stof (IB-methode), CaCO_3 , korrelverdeling en fracties lutum en silt, sulfaat, cyanide (totaal en vrij), minerale olie, PAK's, PCB's en (na ontsluiting met koningswater) totaal-zwavel, arseen, cadmium, zink en koper. Tevens is een enkelvoudige schudtest uitgevoerd volgens NEN 7349 (L/S 20, 1 dag). Deze test is gebruikt als benadering van de in het Bouwstoffenbesluit voorgeschreven kolomtest (L/S 10, 3 weken). In de uitloogvloeistof zijn de volgende parameters gemeten: redoxpotentiaal (voor filtratie), pH, geleidbaarheid, sulfaat, totaal-zwavel, DOC (opgeloste organische stof), cyanide (totaal en vrij), arseen, cadmium, koper, zink, ijzer en mangaan.

Beperkt onderzoek tijdens de rijping

Een beperkt onderzoek houdt in dat de fysische rijping wordt gevolgd door middel van analyse van de droogrest en de situdichtheid (volumieke massa) per laag (3 lagen per compartiment). Deze laatste bepaling is niet volgens een normvoorschrift uitgevoerd, omdat hiervoor niet voldoende monstermateriaal beschikbaar was. De bepaling is uitgevoerd door een hoeveelheid monster van circa 20 g in een cilinder met een maatverdeling te brengen en het materiaal voorzichtig aan te drukken, zodat er geen ingesloten lucht (grotere holle ruimten) meer aanwezig is. In relatie tot de genormeerde bepaling zijn de verkregen resultaten indicatief. Deze zijn wel geschikt voor onderlinge vergelijking, zodat het verloop van de rijping ook door middel van deze parameter kan worden gevolgd.

Uitgebreid onderzoek tijdens de rijping

Naast de voorgaande bepalingen worden op mengmonsters van de compartimenten de volgende analyses uitgevoerd: gloeirest, sulfaat, totaal-zwavel (na ontsluiting met koningswater), minerale olie en PAK's. Tevens wordt een schudtest uitgevoerd met dezelfde analyses als in het uitgangsmonster, behalve DOC, arseen, koper en cyanide. Enkele malen zijn ook bepalingen uitgevoerd per laag, met name van minerale olie en sulfaat. Dit is aangegeven in tabel 13 (zie 6.2.6).

Eindmonster

Het eindmonster wordt op dezelfde wijze geanalyseerd als het uitgangsmateriaal. Cyaniden zijn niet meer bepaald, omdat deze meestal niet in meetbare hoeveelheden aanwezig waren.

Drainwater

Drainwater is tweemaal geanalyseerd op ijzer, mangaan, arseen, koper, cadmium, zink, totaal-zwavel, CZV, Kjeldahl-stikstof en cyanide (totaal).

Versnelde rijping

Een mengmonster van het slib uit alle compartimenten is gebruikt voor een versnelde rijpingstest. Hiertoe is een slurry gemaakt van de specie in water, met een vloeistof/vaste stof-verhouding (L/S-verhouding) van 10 l/kg ds. Deze slurry is gedurende 8 weken belucht en geroerd bij een temperatuur van 31 - 34 °C. Door de verhoogde temperatuur en de intensieve menging wordt de rijping versneld en gemaximaliseerd. De volgende bepalingen zijn uitgevoerd:

1. uitgangsmateriaal en eindmonster (vaste stof): droogrest, cyanide, totaal-zwavel, PAK's, minerale olie, PCB's en OCB's;
2. vaste fase tijdens de rijping: na 1, 2 en 4 weken analyse op droogrest, gloeirest, minerale olie en PAK's;
3. vloeistoffase: wekelijks meting van zuurstofgehalte, redoxpotentiaal, pH, geleidbaarheid en temperatuur. Na 1, 7, 14, 28 en 56 dagen analyse op cyanide (vrij), koper, zink, cadmium, totaal-zwavel en sulfaat.

6.2.6 Overzicht van werkzaamheden en meetfrequenties

In tabel 13 is een chronologisch overzicht gegeven van de werkzaamheden. De start van de rijping is het tijdstip waarop bovenstaand water (grotendeels) is verwijderd. Voor die tijd was het slib waterverzadigd en zal er (mede gezien de lage temperaturen) geen chemische rijping zijn opgetreden.

Tabel 13. Chronologisch overzicht van werkzaamheden (zie 6.2.4 en 6.2.5 voor inhoud controle en analysewerk).

kalenderweek	rijpingsduur (weken)	werkzaamheden
1/99	-	monsterneming specie Belfeld
4	-	vullen van de compartimenten
6	0	water afgepompt, start verwarming
8	2	monsterneming, beperkte analyse
10	4	controle
12	6	monsterneming, beperkte analyse, drainwateranalyse
14	8	controle
16	10	monsterneming, uitgebreide analyse
18	12	controle
20	14	monsterneming, beperkte analyse
22	16	controle
24	18	monsterneming, uitgebreide analyse
26	20	controle
28	22	monsterneming, uitgebreide analyse (plus minerale olie, sulfaat in boven- en onderlaag)
30	24	controle
32	26	monsterneming, uitgebreide analyse (plus minerale olie, sulfaat in boven- en onderlaag; geen uitloogonderzoek)
34	28	controle
36	30	controle
43	37	controle
44	38	eindbemonstering, uitgebreide analyse
46	40	aanvullende monsterneming per laag, analyse minerale olie, sulfaat, totaal-S, fracties < 2 en < 16 µm in drie lagen

6.3 Resultaten

6.3.1 Weersomstandigheden

De weersgegevens zijn afkomstig van de KNMI-meetstations Deelen (temperatuur) en De Bilt (overige waarnemingen). Deelen is het dichtstbijzijnde meetstation, maar hier waren alleen van de temperatuur langjarige gemiddelden beschikbaar. De langjarige gemiddelden zijn nodig om

een indruk te krijgen van de 'representativiteit' van de weersomstandigheden in het onderzoeksjaar. De gegevens zijn samengevat in tabel 14.

Tabel 14. Weersgegevens van Deelen en De Bilt plus langjarige gemiddelden ¹⁾.

maand	temperatuur (°C)		neerslag (mm)		verdamping (mm)		neerslagoverschot (cumulatief, mm)		bodemtemperatuur 20 cm (°C)	
	maand	norm	maand	norm	maand	norm	maand	norm	maand	norm
januari	4,6	1,6	96,0	65,7	9,0	7,7	87	58	5,5	3,9
februari	2,4	2,1	70,4	47,8	14,6	15,4	55,8	32,4	4,3	3,2
maart	6,9	4,6	86,0	62,9	31,3	30,9	54,7	32,0	7,2	5,4
april	9,7	7,8	62,0	51,5	58,4	54,1	3,6	-2,6	10,5	8,7
mei	13,9	12,2	51,8	61,2	92,6	81,9	-40,8	-20,7	14,5	12,7
juni	14,7	15,1	89,2	68,3	91,3	89,7	-2,1	-21,4	16,4	15,5
juli	19,0	16,6	36,5	74,9	109,4	89,3	-72,9	-14,4	18,9	17,5
augustus	17,4	16,6	93,9	70,9	76,5	78,3	17,4	-7,4	18,5	17,4
september	17,7	13,8	67,9	66,7	54,6	49,8	13,3	16,9	17,5	15,2
oktober	10,2	10,2	42,7	72,0	25,8	27,9	16,9	44,1	12,7	12,2

¹⁾ Temperatuur Deelen, overige gegevens De Bilt.

Uit tabel 14 blijkt dat 1999 een relatief warm jaar is en, met name in de eerste helft, ook relatief nat. Qua temperatuur is vooral september afwijkend (bijna 4 °C warmer dan normaal), qua regenval zijn februari, maart, juni en augustus relatief nat, terwijl juli en oktober droge maanden zijn. Voor de gehele onderzoeksperiode van februari tot en met oktober geldt dat de maandgemiddelde luchttemperatuur 1,5 °C hoger is dan de norm. De bodemtemperatuur op 20 cm diepte is 1,4 °C hoger dan de norm. Aangezien de temperatuur in de verwarmde specie ook hoger is ingesteld, zodat het beoogde temperatuurverschil gemiddeld is gehandhaafd, is het energieverbruik niet lager dan in een normjaar. Voor de gehele periode geldt dat de (cumulatieve) neerslag en verdamping niet veel afwijken van de normwaarden: de neerslag is 24 mm groter dan de norm en het neerslagoverschot 13 mm. Voor de eerste helft van de periode (februari tot en met juni) zijn de afwijkingen veel groter: de neerslag is 68 mm groter en het neerslagoverschot 52 mm. In deze eerste periode kan de fysische rijping dus vertraagd zijn en is mogelijk relatief meer energie nodig geweest voor de verdamping van water.

Aangezien het neerslagpatroon van plaats tot plaats verschillend is, zijn in tabel 15 de neerslaggegevens van De Bilt, Deelen en de naast de proeflocatie gelegen zuiveringsinstallatie (RWZI) weergegeven. De metingen op de RWZI zijn niet volgens het KNMI-protocol uitgevoerd, maar dit zal waarschijnlijk niet tot een sterk afwijkend beeld leiden.

Tabel 15. Neerslaggegevens van De Bilt, Deelen en RWZI Zutphen ¹⁾.

maand	De Bilt		Deelen		Zutphen	
	maand	cumulatief	maand	cumulatief	maand	cumulatief
februari	70,4	70	68,6	69	56,5	57
maart	86	156	89,8	158	92	149
april	62	218	70,1	229	58,5	207
mei	51,8	270	62,5	291	62,5	267
juni	89,2	359	86,7	378	46,5	316
juli	36,5	396	53,9	432	123	439
augustus	93,9	490	75,0	507	90,4	529
september	67,9	558	37,7	544	31,3	561
oktober	47,7	600	33,7	578	57,5	618

¹⁾ De Bilt en Deelen zijn KNMI-stations, RWZI Zutphen voert zelf metingen uit.

Uit tabel 15 blijkt dat de totale neerslag op de drie stations elkaar weinig ontloopt. In de periode tot en met mei zijn de verschillen ook beperkt, maar in de maanden juni, juli en september zijn er relatief grote verschillen tussen Zutphen en De Bilt. Op hoofdlijnen leiden deze gegevens niet tot andere conclusies omtrent de representativiteit van de periode. Wel is duidelijk dat voor een gedetailleerde analyse van de vochthuishouding locale gegevens zijn vereist.

Tenslotte wordt nog een vergelijking gemaakt tussen de gemeten bodemtemperaturen en de metingen in de niet-verwarmde referentiebak. Omdat de baggerspecie op de bodem ligt, zou het materiaal gemakkelijker kunnen opwarmen dan de bodem zelf. De meetwaarden worden vergeleken in tabel 16. Hieruit blijkt dat de temperatuur in de baggerspecie in de meeste maanden hoger is dan in de bodem. Wanneer in de bodem ook op 30 cm diepte gemeten zou zijn, zou het verschil nog wat groter zijn². Daarentegen is de baggerspecietemperatuur in februari lager dan de bodemtemperatuur. De baggerspecie wordt dus duidelijk sterker beïnvloed door de atmosferische temperatuur dan de bodem. Aangezien de rijping hoofdzakelijk in de zomerperiode plaatsvindt, is het qua temperatuur gunstig om depots verhoogd (op de bodem) aan te leggen in plaats van verdiept (in de bodem). De ligging op de bodem zorgt ervoor dat de gemiddelde temperatuur in de proefdepots in de zomerperiode (april tot en met september) 2,4 °C hoger is dan de overeenkomstige bodemtemperatuur. Mogelijk is dit effect in grootschalige praktijkdepots wat kleiner.

Samenvattend wordt qua weersomstandigheden het volgende geconcludeerd:

1. De onderzoeksperiode is 1,5 °C warmer dan gemiddeld. Verder is met name de voorjaarsperiode natter dan normaal.
2. De ligging van het depot op de bodem zorgt ervoor dat de gemiddelde zomertemperatuur in de specie ruim 2,4 °C hoger is dan de bodemtemperatuur op een overeenkomstige diepte. De combinatie van een relatief warm jaar en de verhoogde ligging van het depot zorgt ervoor dat de temperaturen in de referentiebak 3 - 4 °C hoger zijn dan was verwacht.
3. Bij de interpretatie van de onderzoeksgegevens moet rekening worden gehouden met afwijkingen van het gemiddelde weerbeeld, met name in de neerslag. Deze afwijkingen zijn in de onderzoeksperiode overigens beperkt.
4. Voor een gedetailleerde analyse van de vochthuishouding zijn neerslaggegevens van een (zeer) nabij gelegen meetstation vereist.

Tabel 16. Bodemtemperatuur op 20 cm diepte en temperatuur in het referentiedepot op 30 cm diepte, in °C.

maand	bodem, 20 cm	baggerspecie, 32 cm	ΔT (bagger - bodem)
februari ¹⁾	4,3	2,5	-1,8
maart	7,2	7,7	0,5
april	10,5	11,6	1,1
mei	14,5	17,0	2,5
juni	16,4	19,4	3,0
juli	18,9	21,3	2,4
augustus	18,5	20,7	2,2
september	17,5	20,8	3,3
oktober	12,7	13,2	0,5

¹⁾ Metingen baggerspecie halve maand, bodem is gemiddelde hele maand.

² Van de bodemtemperatuur zijn waarden bekend op 20 en op 50 cm diepte. Op 50 cm diepte is de temperatuur in de meeste van de beschouwde maanden iets (circa 0,5 °C of minder) lager dan op 20 cm diepte.

6.3.2 Karakterisering van het uitgangsmateriaal

De volledige analyseresultaten van de uitgangsmonsters zijn opgenomen in het deelrapport van Fase 3 [17]. De resultaten zijn samengevat in tabel 17. De samenstelling van de specie in de verschillende vakken is redelijk vergelijkbaar. In vak 2 is meer lutum en silt aanwezig en (waarschijnlijk daaraan gekoppeld) zijn de gehalten van metalen, minerale olie en PAK's enigszins verhoogd.

Tabel 17. Samenstelling van het uitgangsmateriaal.

parameter	vak 1 (referentie)	vak 2 (+5 °C)	vak 3 (+10 °C)	MM rijpingstest
droogrest (%)	53,2	53,3	59,8	55,9
gloeiverlies (% van ds)	10	9	8	-
organische stof (% van ds)	7,5	7,3	5,9	-
CaCO ₃ (% van ds)	13	12	11	-
fractie < 2 µm (% van ds)	12	20	13	-
fractie < 16 µm (% van ds)	21	37	20	-
fractie > 63 µm	45	25	1) ¹⁾	-
totaal-S (mg/kg ds)	2200	2100	1500	1900
sulfaat (mg/kg ds)	1800	320	190	-
cyanide-totaal (mg/kg ds)	2	2	< 1	3
cyanide-vrij (mg/kg ds)	< 1	< 1	< 1	< 1
arseen (mg/kg ds)	8	15	9	-
cadmium (mg/kg ds)	8	12	7	-
koper (mg/kg ds)	100	85	55	-
zink (mg/kg ds)	600	700	490	-
minerale olie (mg/kg ds)	1300	1500	1200 ²⁾	1200
PAK 10 VROM (mg/kg ds)	10	16	12	8
PAK 16 EPA (mg/kg ds)	14	21	15	10
PCB's (som 7) (mg/kg ds)	0,16	0,17	0,19	0,13
OCB's (mg/kg ds)	-	-	-	0,09 ³⁾

¹⁾ De meetwaarde van 71 % is onwaarschijnlijk. Deze wordt opnieuw bepaald in het eindmonster.

²⁾ De gemeten waarde van 720 mg/kg ds is op basis van latere analyses op het materiaal uit dit vak onjuist. Aangehouden wordt de waarde van het uitgangsmateriaal van de rijpingstest, dit is een gemiddelde van alle vakken.

³⁾ Van de verschillende organochloorbestrijdingsmiddelen is alleen hexachloorbenzeen aangetoond.

Betwifteld wordt of de verschillen in de korrelverdeling tussen de vakken zo groot zijn, daarom zijn de parameters in de eindmonsters nogmaals gecontroleerd. Opmerkelijk zijn de relatief grote verschillen in sulfaatgehalten, die bevestigd worden door de resultaten van uitloogtests (zie 6.3.6). Omdat de verschillen slechts zeer ten dele te relateren zijn aan de andere parameters (totaal-zwavel, macrosamenstelling) lijkt hier sprake te zijn van een toevallige uitschieter.

Op basis van de korrelverdeling en het organische stofgehalte wordt de specie geclassificeerd als siltig (vak 2 als kleiig).

Ten opzichte van het Bouwstoffenbesluit [4] is qua samenstelling alleen minerale olie kritisch; het gehalte is ruim tweemaal zo groot als de grenswaarde van 500 mg/kg ds. In het geval van vak 1 ligt het zinkgehalte iets boven de grenswaarde van 520 mg/kg ds. Voor de toetsing van de uitlooging moet worden uitgegaan van gerijpt materiaal. Hierop wordt in 6.3.8 teruggekomen.

De samenstelling van deze specie is vrijwel gelijk aan het materiaal dat in het laboratoriumonderzoek is gebruikt [12]. Alleen de zink- en PAK-gehalten zijn globaal 30 % lager. De kwaliteit van de specie is in de periode tussen de eerste en de tweede monsterneming (ruim 0,5 jaar) dus weinig veranderd.

6.3.3 Versnelde rijpingstest

De resultaten van de metingen van zuurstof, redoxpotentiaal, pH, geleidbaarheid en temperatuur zijn opgenomen in het deelrapport van Fase 3 [17]. Hieruit blijkt dat de pH gedurende de proef iets fluctueert rond neutrale waarden, de geleidbaarheid maximaal 60 % toeneemt en de redoxpotentiaal na 1 dag al een waarde van 300 mV heeft bereikt en dan langzaam verder stijgt naar 400 mV. De gegevens van de vloeistofanalyses zijn samengevat in tabel 18 en figuur 10. Qua trends kan hieruit het volgende worden afgeleid:

1. De oxidatie van zwavel verloopt zeer snel en is na 1 week al vrijwel maximaal. Betrokken op het totaal-zwavelgehalte in de vaste stof is slechts 33 % van het zwavel geoxideerd tot sulfaat. Dit betekent dat het meeste zwavel aanwezig is in zeer stabiele verbindingen. Hierbij wordt onder meer gedacht aan zwavel in humus.
2. De uitloging van zink en cadmium stijgt aanvankelijk relatief sterk, parallel aan die van sulfaat. Mogelijk zijn zink en cadmium daarom (deels) aanwezig in de vorm van metaalsulfiden, die geoxideerd worden. Met name in het geval van zink is er sprake van een uitloogpiek. Zink wordt bij verdere rijping weer vastgelegd. De afname van cadmium is veel kleiner.
3. De uitloging van koper vertoont geen duidelijke trend en cyanide is niet meetbaar.
4. Er treedt geen verzuring op en de specie is niet sterk reducerend.

Bij een laagdikte van 0,5 m voldoen cadmium en zink ruimschoots aan de eisen behorend bij een categorie 1 toepassing van het Bouwstoffenbesluit [4]. Koper overschrijdt deze net en sulfaat ruimschoots. Zowel de rijpings- als de uitloogtestcondities maken deze 'toetsing' louter indicatief. Wel volgt hieruit dat sulfaat en koper potentieel kritisch zijn.

Tabel 18. Verloop van de uitloging tijdens versnelde rijping van baggerspecie in een slurry (alle waarden in mg/kg ds).

parameter	dag 1	dag 7	dag 14	dag 26	dag 56
cyanide-vrij	< 0,02	< 0,02	-	-	< 0,02
sulfaat	990	1800	1900	1900	1900
totaal-S	430	700	650	700	750
cadmium	0,001	0,015	0,014	0,014	0,013
koper	0,60	0,35	0,55	0,75	0,55
zink	0,21	0,95	0,55	0,50	0,49
pH	7,9	7,3	7,2	7,2	7,5
EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	843	1240	1213	1325	1027
Eh (mV)	308	347	341	343	368

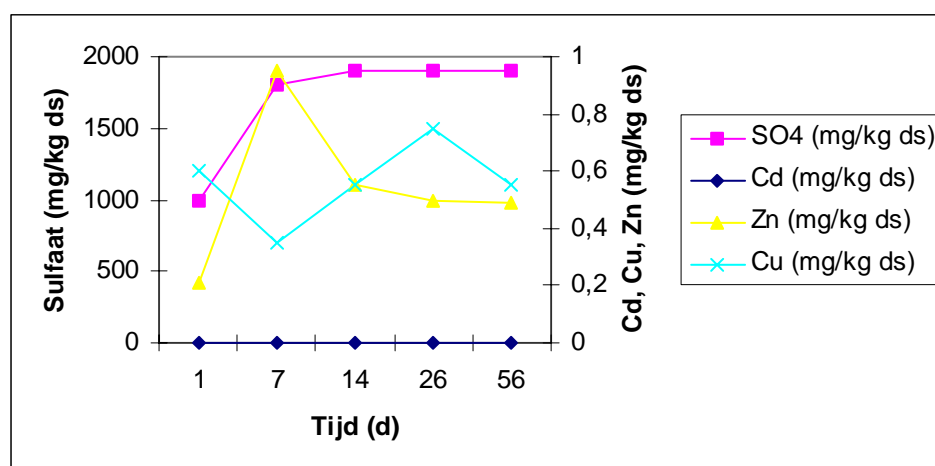


Fig. 10. Verloop van de uitloging van sulfaat, cadmium, zink en koper bij versnelde rijping van baggerspecie in een slurry.

De resultaten van de analyses in de vaste stof zijn samengevat in tabel 19. Uit deze tabel blijkt dat er soms grote fluctuaties optreden in droge stof en organische stof. Gezien de proefopzet moet de droogrest, en wellicht ook het organische stofgehalte, vrijwel constant blijven. De duidelijk verhoogde waarden van de droogrest op dag 14 en dag 56, met daaraan gekoppeld lage waarden van de organische stof, zijn waarschijnlijk het gevolg van niet-representatieve monsters, die te veel zand bevatten. In de slurry treedt namelijk gemakkelijk ontmenging op, waarbij het zand naar de bodem zakt en de lichtere fractie (klei, organische stof) blijft zweven. Hoewel hiermee bij de monsterneming rekening wordt gehouden, is dit blijkbaar toch niet altijd goed verlopen. Omdat de organische verontreinigingen met name aan organische stof zijn gebonden, zijn de gehalten op dag 14 en dag 56 te laag. Uit de analyse op dag 26, die wel representatief is, blijkt dat het gehalte aan minerale olie met circa 40 % is gedaald, maar dat het PAK-gehalte niet is afgenomen.

Uitgaande van een lineaire relatie tussen organische stof en de gehalten aan organische verontreinigingen, is er in de periode tussen dag 26 en dag 56 geen verdere afbraak opgetreden van minerale olie en PAK's. Ten opzichte van het uitgangsmateriaal is er wel een sterke afname opgetreden van het gehalte aan HCB (circa 90 %), terwijl het PCB-gehalte met circa 40 % is gedaald. Met name bij een stof als HCB is de afname mogelijk voor een groot deel het gevolg van vervluchtiging, hoewel ook afbraak kan optreden. Gezien de lage waarden en de problemen met de monsterneming, is het onduidelijk of het cyanidegehalte gedurende de rijping is veranderd.

Tabel 19. Verloop van de samenstelling tijdens versnelde rijping van baggerspecie in een slurry (alle waarden in mg/kg ds).

parameter	dag 0	dag 7	dag 14	dag 26	dag 56
droogrest (%)	55,9	49,8	66,7	50,3	78,6
gloeiverlies (% van ds)	(9)*	13	6	11,0	3,0
cyanide-totaal (mg/kg ds)	3	-	-	-	< 1
cyanide-vrij (mg/kg ds)	< 1	-	-	-	< 1
PAK 10 (mg/kg ds)	8,0	13,0	5,2	9,6	2,8
minerale olie (mg/kg ds)	1200	1200	350	740	210
HCB (mg/kg ds)	0,090	-	-	-	0,002
PCB (mg/kg ds)	0,130	-	-	-	0,021

* Dit is een gemiddelde van de analyses van de 3 proefvakken.

Samenvattend kan uit de rijpingsproef het volgende worden geconcludeerd:

1. De mobiliteit van zink en cadmium neemt tijdens de rijping eerst toe, maar met name zink wordt bij verdere rijping weer vastgelegd.
2. Minerale olie is in elk geval voor een deel (40 %) afbreekbaar. Het is onduidelijk of op langere termijn nog een verdere afname optreedt.
3. De aanwezige PAK's zijn niet afbreekbaar.
4. De gehalten aan HCB en in mindere mate PCB's dalen gedurende de rijping sterk respectievelijk matig. Met name in het geval van HCB kan vervluchtiging een rol spelen.
5. In relatie tot het Bouwstoffenbesluit [4] kan de uitloging van koper en sulfaat kritisch zijn (> categorie 1) en is het nog onzeker of de grenswaarde voor minerale olie wordt bereikt. De genoemde parameters moeten daarom zeker worden gemonitord tijdens de veldproef.
6. De zwaveloxidatie verloopt aanzienlijk sneller dan de afbraak van minerale olie. In dit slurry-systeem is sulfaat dus geen goede rijpingsindicator. Dit geldt ook voor de pH en de redox-potentiaal, die al snel min of meer stabiele waarden bereiken. Gezien de sterke afwijking van veldcondities, moet de bruikbaarheid als rijpingsindicator aan de hand van de resultaten van de veldproef nader worden getoetst.

7. Uit de vergelijking met de resultaten van het laboratoriumonderzoek [12] blijkt dat de resultaten van de nu uitgevoerde proef goed overeenkomen met de eerder uitgevoerde slurryproef bij 30 °C. Dit geldt zowel voor snelheden als afbraakrendementen, alleen is bij de eerste proef wel afbraak van PAK's gevonden (circa 30 %). In combinatie met de overeenkomsten in samenstelling (zie 6.3.2) betekent dit dat de nu bemonsterde specie vrijwel identiek is aan het materiaal dat gebruikt is in het eerdere laboratoriumonderzoek [12].

6.3.4 Veldproef, veldwaarnemingen

De waarnemingen zijn in meer detail weergegeven in het deelrapport van Fase 3 [17]. De belangrijkste resultaten worden hierna samengevat.

Water

In tabel 20 zijn de totale hoeveelheden verwijderd drainwater en 'oppervlakkig afstromend'³ water weergegeven. In beide verwarmde vakken is, in tegenstelling tot de referentie, weinig water verwijderd. Dit houdt in dat door verwarming het water uit de specie primair door verdamping wordt verwijderd. Enkele kanttekeningen hierbij zijn:

1. voor de start van de proef is in alle vakken zoveel mogelijk water afgepompt;
2. in de eerste 2 weken van de proef was de temperatuur in de verwarmde vakken te hoog, waardoor de verschillen enigszins gechargeerd zijn;
3. het water is hoofdzakelijk in de maand maart verwijderd, daarna wordt de verdamping in alle vakken het belangrijkste mechanisme waardoor een verdere afname van het vochtgehalte optreedt.

Tabel 20. Cumulatieve hoeveelheden verwijderd drainwater en oppervlakkig afstromend water (in l).

	vak 1 (referentie)	vak 2 (5 °C verhoogd)	vak 3 (10 °C verhoogd)
drainwater	46	0	3
oppervlakkig afstromend	117	7	0

Scheurvorming

Er zijn alleen oppervlakkige scheuren ontstaan. Dit hangt waarschijnlijk samen met het relatief lage lutumgehalte van de grond. Het is bekend dat in kleiige specie omvangrijke vorming van krimpscheuren optreedt, die een belangrijke rol spelen bij de toevoer van zuurstof. Aanvankelijk is wel enige krimp langs de wanden van het depot waargenomen, maar bij het einde van de proef was deze ruimte weer geheel gevuld. Hierbij kan verkrumming of dichtslibbing een rol hebben gespeeld. Een en ander betekent dat zowel de zuurstoftoevoer als de verdamping vrijwel volledig via de poriën moet hebben plaatsgevonden. Uitwisseling via krimpscheuren is te verwaarlozen.

Plantengroei

Hoewel op alle vakken plantengroei is ontstaan, zijn er opmerkelijke verschillen tussen de vakken. In de verwarmde vakken is de plantengroei duidelijk eerder begonnen (begin mei) en is de ontwikkeling ook uitbundiger dan in het referentievak. In tabel 21 is een beschrijving gegeven van de plantengroei op 6 juli. Hieruit blijkt dat vak 2 vrijwel geheel is bedekt met relatief hoge planten, vak 3 gedeeltelijk en dat de referentie duidelijk achterblijft.

³ Bij deze proef gaat het om water dat op de specie bleef staan. In een praktijkdepot kan dit afstromen.

Er zijn hiervoor verschillende verklaringen mogelijk:

1. verhoogde temperatuur in de verwarmde vakken: zaden kiemen eerder, planten groeien sneller;
2. versnelde rijping in de verwarmde vakken: zaden kiemen eerder, planten kunnen dieper wortelen;
3. combinaties van meerdere factoren.

Tabel 21. Plantengroei in de proefvakken op 6 juli 1999.

	vak 1 (referentie)	vak 2 (5 °C verhoogd)	vak 3 (10 °C verhoogd)
bedekking (%)	50	90	60
gemiddelde hoogte (cm)	30	70	70

Bij de ontmanteling van de proefvakken is waargenomen dat de bewortelingsdiepte in vak 2 duidelijk groter is dan in de referentie. In het referentievak is deze circa 20 cm, in vak 2 globaal 50 cm. De diepere beworteling is waarschijnlijk het gevolg van de snellere rijping in vak 2. De achterblijvende ontwikkeling van de plantengroei in vak 3 is waarschijnlijk het gevolg van een slechte structuur van de grond door sterke kluitvorming in de bovenlaag (zie onder "Structuur van de grond, laagvorming" van deze paragraaf).

Zoals is te zien op de foto (zie fig. 12), is perzikkruid de overheersende soort, daarnaast zijn brandnetels, kamille, boerenwormkruid, melde, doornappel en luzerne aangetroffen.



Fig. 12. Foto van de plantengroei in vak 2, juli.

Temperatuur

De gemiddelde temperaturen zijn vermeld in 6.2.3 (zie tabel 11). Naast verschillen als gevolg van verwarming, is er tussen vak 2 en 3 ook een verschil in het dag/nachtritme (zie fig. 13). Het is duidelijk dat de fluctuaties in vak 3 veel groter zijn dan in vak 2. Als voorbeeld is het gemiddelde verschil in maximum en minimum dagtemperatuur berekend over de maand juni: dit is in vak 2 3,5 °C en in vak 3 14,8 °C⁴. Dit grote verschil is waarschijnlijk het gevolg van verschillen in begroeiing, die een dempende werking heeft. Vak 2 is zoals vermeld volledig en dicht begroeid, terwijl in vak 3 in juni nog open stukken aanwezig waren. De temperatuursonde bevond zich op het grensvlak van een begroeid en een open deel. Grote temperatuursfluctuaties in onbegroeide terreinen zijn een bekend fenomeen; de warmte wordt gemakkelijk opgenomen maar wordt 's nachts weer uitgestraald naar de atmosfeer. De sterke temperatuursfluctuaties zijn waarschijnlijk ongunstig voor de ontwikkeling van de microflora in de rijpende specie, omdat organismen in relatief beperkte temperatuurgebieden optimaal groeien. Overigens beperken de sterke fluctuaties zich tot de toplaag; halverwege de specielaag is het dag/nachtritme nauwelijks waarneembaar. Op dit niveau zijn de fluctuaties als gevolg van het aan- en uitschakelen van de verwarming nog wel zichtbaar (verwezen wordt naar bijlage 3 van het deelrapport van Fase 3 [17] voor meer details).

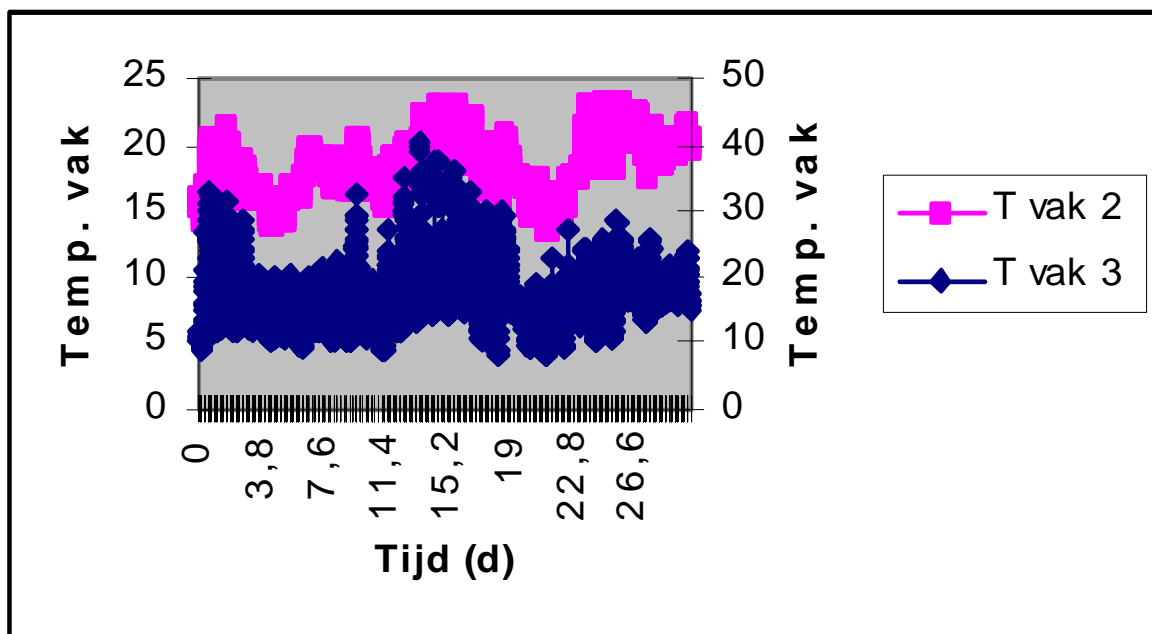


Fig. 13. Verloop van de temperatuur op 5 cm diepte in de maand juni, vakken 2 en 3.

Inklinking

De inklinking is in alle drie de vakken aan het eind van de proef 15 - 18 % ten opzichte van de aanvangsdikte van de specielaag. Rekening houdend met een meetnauwkeurigheid van 3 % (absoluut), is er geen significant verschil tussen de vakken onderling. Wel verloopt de inklinking in de verwarmde vakken sneller dan in de referentie. In de verwarmde vakken is de inklinking in 40 dagen voltooid en in de referentie duurt dit in totaal 122 dagen; 90 % van de inklinking is voltooid in 94 dagen. De inklinking is in absolute zin geen goede maat voor de fysische rijping. Deze duurt globaal tweemaal zo lang als de inklinking (zie tabel 22 in 6.3.5).

⁴ Het is denkbaar dat de verschillen als gevolg van tekortkomingen in de meetmethode in werkelijkheid wat kleiner zijn dan is berekend. De orde van grootte zal echter juist zijn.

Structuur van de grond, laagvorming

Bij de eindbemonstering is gebleken dat de gerijpte specie in de referentie en in vak 2 over de gehele laagdikte een kruimelige structuur heeft. Vak 3 wijkt duidelijk af, het monster uit de bovenste laag bevat veel harde kluiten. Onderin is vak 3 duidelijk natter dan de vakken 1 en 2 en het materiaal uit de onderste lagen bevat ook meer kluiten. Bij het breken hiervan is regelmatig te zien dat de buitenste rand van de kluit geoxideerd is (bruin), maar dat deze binnenin nog gereduceerd is (grijs).

Het materiaal uit alle vakken bevat schelpen en grovere stukken organisch materiaal, zoals resten van stengels, blad en stukjes veenachtig materiaal. Deze stukken organisch materiaal zitten vaak in de kern van kleibrokjes of zijn althans omgeven door klei. Dit betekent dat afbraak van deze organische stof of van verontreinigingen, zoals minerale olie, die aan het organische materiaal geadsorbeerd kunnen zijn, niet of moeizaam zal verlopen. Op het oog lijken de onderste lagen aangerijkt te zijn met schelpen en zand. Dit is mogelijk omdat deze zwaardere fracties na het vullen door de natte specie naar beneden kunnen zakken.

Gezien de aanwezigheid van schelpen en grover organisch materiaal is er een gerede kans op fluctuaties in de bepalingen van kalk en organische stof. Dit is alleen te voorkomen door de combinatie van veel deelmonsters en het machinaal homogeniseren van relatief grote mengmonsters (orde van grootte van 1 kg).

Het is duidelijk dat de structuur van de grond en de aanwezigheid van grovere delen invloed zullen hebben op het verloop van het rijpingsproces. Een slechte structuur zal er toe leiden dat zuurstof niet of moeilijker kan toetreden. Vak 3 wijkt wat dit betreft af van de andere vakken, zodat hiervoor een slechtere (in elk geval tragere) rijping wordt verwacht. Dit komt niet alleen door een slechtere zuurstoftoevoer, maar ook omdat de bovenste laag zodanig 'verkit' is, dat de verdamping van water uit de onderliggende lagen waarschijnlijk wordt geremd.

6.3.5 Verloop van de fysische rijping van de veldproef

Het verloop van de fysische rijping is weergegeven in figuur 14, waarin de rijpingsfactor is uitgezet tegen de tijd. Voor de volledige gegevens wordt verwezen naar het deelrapport van Fase 3 [17]. De rijping blijkt in vak 2 duidelijk te zijn versneld ten opzichte van de referentie, terwijl het verschil tussen vak 3 en de referentie veel kleiner is.

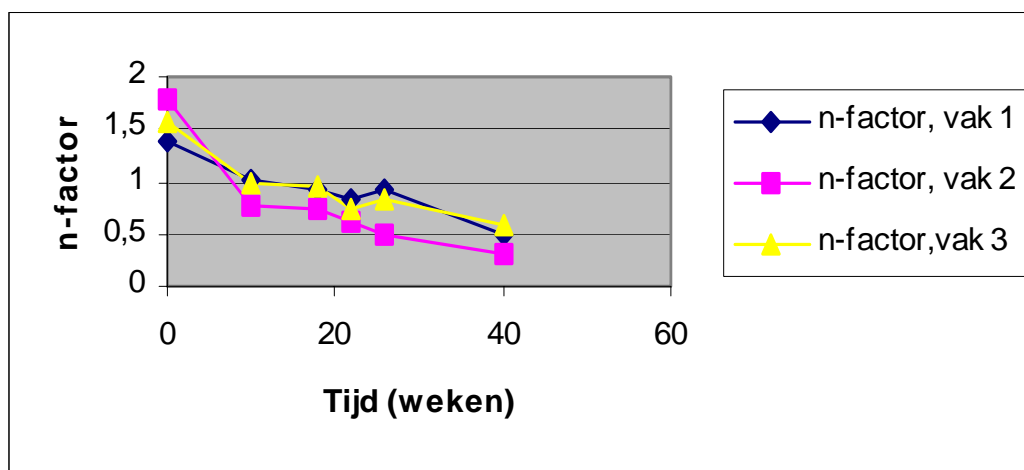


Fig. 14. Verloop van de fysische rijping: n-factor als functie van de tijd.

De rijping van de specie als geheel duurt in het referentievak 0,6 jaar, een normale waarde voor siltige specie. In vak 2 verloopt de rijping 1,6 keer zo snel, maar in vak 3 is er geen verschil ten opzichte van de referentie. Zoals blijkt uit tabel 22 verloopt de rijping niet alleen in zijn geheel sneller, maar ook gelijkmatiger. Normaliter verloopt de rijping laagsgewijs, te beginnen aan de bovenzijde omdat daar de verdamping van water plaatsvindt. Door toevoer van warmte aan de onderzijde, wordt het water versneld naar boven verplaatst. In alle vakken is er de tendens dat de rijping van de middenlaag het langst duurt. Het kan zijn dat daar sprake is van een zekere stagnatie door de combinatie van opwaarts transport uit de onderlaag en neerwaarts transport bij regenval.

Tabel 22. Tijdsduur in weken vanaf het inbrengen van specie in vakken voor volledige fysische rijping ($n < 0,7$)¹⁾.

	vak 1 (referentie)	vak 2 (5 °C verhoogd)	vak 3 (10 °C verhoogd)
gehele laag	33	21	33
bovenlaag	14	10	circa 20
middenlaag	circa 35	circa 20	34
onderlaag	circa 30	18	circa 26 ²⁾

¹⁾ Ten opzichte van het tijdstip van vullen moeten bij alle waarden 2 weken worden opgeteld.

²⁾ Op $t = 18$ weken was de waarde ook $al < 0,7$, daarna was er weer een tijdelijke toename.

Het verschil in rijpingstijd tussen de boven- en de middenlaag is in vak 1 - 3 respectievelijk een factor 2,5, 2,0 en 1,7. Het lijkt er dus op dat de rijping gelijkmatiger verloopt naarmate sterker wordt verwarmd. Het in absolute zin geringe effect van de verwarming in vak 3 is waarschijnlijk het gevolg van structuurproblemen met de grond (zie 6.3.11).

Samenvattend wordt het volgende geconcludeerd:

1. het materiaal is in alle vakken fysisch gerijpt;
2. een matige temperatuurverhoging kan de fysische rijping met een factor 1,6 versnellen en resulteert ook in een meer gelijkmatige rijping over de diepte.

6.3.6 Verloop van de chemische rijping van de veldproef

De chemische rijping bestaat uit een groot aantal processen, die niet allemaal even snel verlopen. Hierna wordt in het kort besproken welke processen zijn opgetreden en in hoeverre de chemische rijping al volledig is.

Organische stof

Organische stof is standaard gemeten als gloeiverlies, in begin- en eindmonsters ook als oxideerbaar koolstof (IB-methode). Door het meebepalen van sulfiden en bij de IB-methode ook tweewaardig ijzer, kan de afbraak van organische stof worden overschat. In dit geval zal de fout gering zijn; er is circa 0,06 % zwavel geoxideerd bij gehalten van organische stof van circa 10 %.

De resultaten van de bepalingen zijn samengevat in tabel 23. Hieruit blijkt dat het gloeiverlies fluctueert, waarschijnlijk als gevolg van de aanwezigheid van grovere stukken organisch materiaal in de specie (stengelresten e.d.). Verschillen van +/- 2 % (van ds) lijken niet significant. Er zijn daarom geen aanwijzingen dat organische stof in belangrijke mate wordt afgebroken. De bepalingen van oxideerbare organische stof wijzen op een geringe toename. Hoewel deze verschillen waarschijnlijk evenmin significant zijn, is een toename denkbaar als gevolg van beworteling door planten. Het gehalte aan oplosbare organische stof neemt af, maar deze afname is van weinig betekenis voor het totaalgehalte (-0,05 %). Een dergelijke afname is wel belangrijk voor de kwaliteit van drainwater en de mobiliteit van verontreinigingen.

Tabel 23. Gloeiverlies en gehalten aan oxideerbare en oplosbare organische stof voor, na en tijdens de rijping.

week	gloeiverlies in % van ds		
	vak 1	vak 2	vak 3
0	10	9	8
10	10	8	8
18	10	9	9
22	9	7	9
26	9	9	10
38	9	10	8
	oxideerbare organische stof in % van ds		
0	7,5	7,3	5,9
38	7,7	7,7	6,4
	oplosbare organische stof, DOC, in mg/kg ds ¹⁾		
0	380	320	186
38	114	184	134

¹⁾ Bepaald via schudtest L/S 20.

Het is duidelijk dat de (beperkte) temperatuurverhoging in de vakken 2 en 3 niet resulteert in (extra) afbraak van organische stof in de vaste fase. Het gehalte aan oplosbare organische stof is in de vakken 1, 2 en 3 gedaald met respectievelijk 70, 43 en 28 %. Dit wijst dus evenmin op een positief effect van temperatuurverhoging⁵.

Zwavel

Tijdens de rijping zullen sulfiden ten minste voor een deel worden omgezet in sulfaat, waardoor het sulfaatgehalte in de specie toeneemt. Sulfaat is zowel direct in de specie gemeten als in het uitloogwater van de schudproeven. Beide waarden komen vrijwel steeds goed met elkaar overeen. Op basis van het totaal-zwavelgehalte is de zwaveloxidatie berekend (% sulfaat-S van totaal-S). De waarden die zijn afgeleid uit de vaste stofanalyses zijn weergegeven in figuur 15. Het wat grillige verloop is primair het gevolg van inhomogeniteit van de baggerspecie. In perioden met veel neerslag is het verder niet uitgesloten dat de zwaveloxidatie tijdelijk omslaat in sulfaatreductie. In tegenstelling tot veel andere parameters verandert de mate van zwaveloxidatie sterk gedurende de rijping en zijn er ook duidelijke verschillen tussen de vakken. Op basis van de maximale oxidatie bij de versnelde rijpingstest (33 %) is het materiaal uit vak 2 na 26 weken volledig chemisch gerijpt en in vak 1 na 38 weken. In vak 3 is de oxidatie na 40 weken nog niet voltooid, hetgeen een gevolg is van een achterblijvende rijping in de onderste lagen. Uit de duidelijke veranderingen en verschillen in de mate van zwaveloxidatie kan worden afgeleid dat deze parameter een goede rijpingsindicator is. Overigens is de hoge beginwaarde van de referentie niet te verklaren, hier moet sprake zijn van contaminatie of iets dergelijks. De tijdelijke afname in de vakken 2 en 3 in week 18 kan het gevolg zijn van sulfaatreductie, bijvoorbeeld als gevolg van neerwaartse percolatie naar een anaërobe zone (uitspoeling treedt in deze vakken vrijwel niet op).

⁵ De verschillen wijzen op een negatief effect van verwarming. Dit is echter niet aannemelijk. Wel blijft de rijping in vak 3, zoals bekend, achter. De verschillen in afbraak zijn deels het gevolg van verschillen in begingehalten, waarvan onduidelijk is of deze representatief zijn.

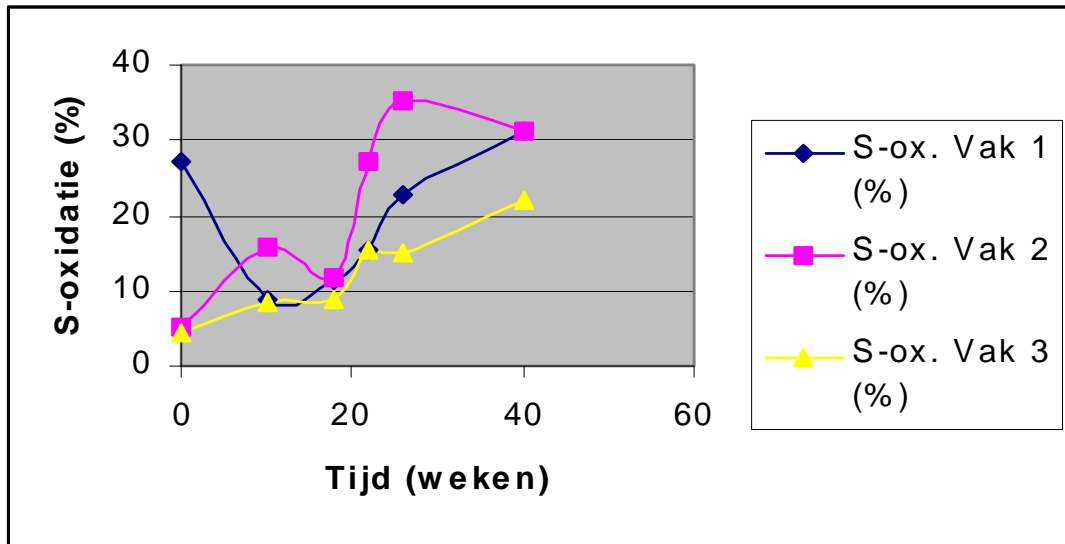


Fig. 15. Verloop van de zwaveloxidatie (% sulfaat-S van totaal-S) als functie van de rijpingstijd (vaste stofanalyses).

6.3.7 Redoxpotentiaal, pH en metalen

De hiernavolgende parameters zijn alle gemeten in het uitloogwater van schudtests. De volledige gegevens zijn opgenomen in het deelrapport van Fase 3 [17]. De exacte waarden van begin- en einduitloging worden gegeven in tabel 27 (zie 6.3.8), waarin vergelijking met de toetsingswaarden van het Bouwstoffenbesluit [4] plaatsvindt.

1. Overall oxidatie: de resultante van alle redoxreacties komt tot uiting in de redoxpotentiaal van de specie. Hierbij is de meetmethode wel cruciaal; eigenlijk geven alleen in situ metingen een juist beeld. Uit de laboratoriummetingen blijkt dat de redoxpotentiaal, zoals gemeten in uitloogvloeistoffen, in de loop van de tijd weinig verandert. De waarden liggen meestal rond de 300 mV. De eindwaarden liggen tussen 350 en 370 mV voor alle drie de proefvakken. Er zijn dus nauwelijks verschillen, terwijl de specie in vak 3 minder ver is gerijpt dan in de overige vakken. Bij de gehanteerde meetmethode is de redoxpotentiaal niet onderscheidend. Het is echter wel duidelijk dat de specie vanaf de aanvang niet sterk gereduceerd is.
2. pH: gedurende de rijping stijgt de pH van 7,2 naar 7,6. De laatste meting geeft een afwijkend beeld, met waarden van 6,5, 6,7 en 7,1 in de vakken 1,2 respectievelijk 3. Hoewel als gevolg van rijping verzuring kan optreden, zal dit bij deze specie, gezien het kalkgehalte van circa 10 %, niet optreden. Het is niet duidelijk of de laatste meetwaarden toevallig aan de lage kant zijn of dat er werkelijk sprake is van een afname van de pH als gevolg van rijpingsreacties.
3. IJzeroxidatie: in overeenstemming met de relatief hoge redoxwaarden is er weinig opgelost ijzer aanwezig. Na 10 - 18 weken is de ijzerconcentratie gedaald tot waarden < detectiegrens. Geconcludeerd wordt dat de ijzeroxidatie compleet is. Op latere tijdstippen wordt nog wel enkele malen enig ijzer aangetroffen, wellicht als gevolg van de aanwezigheid van colloïdale deeltjes. In vak 3 is in week 22 en week 38 nog ijzer aanwezig, hetgeen wordt verklaard uit anaërobe kluiten in de onderste lagen van dit vak.
4. Mangaanoxidatie: ten opzichte van de beginwaarden zijn de mangaanconcentraties aan het eind licht gedaald in vak 1 maar sterk toegenomen in de vakken 2 en met name in vak 3. Hoewel in vak 3 wel anaërobe spots aanwezig zijn, is de sterke toename niet goed verklaarbaar en dit geldt zeker voor vak 2. Gezien de overige resultaten is mangaan blijkbaar geen goede rijpingsindicator.
5. Cadmium en zink: bij de laatste meting is cadmium in de vakken 1 en 2 afgenomen ten opzichte van de beginwaarde en in vak 3 is de uitloging (nog) verhoogd. Mogelijk is er sprake

van tijdelijke piekjes in de uitloging. Zink is in alle vakken toegenomen ten opzichte van de beginwaarden, de eindkwaliteit verschilt per vak weinig. In tegenstelling tot de laboratoriumproeven is er geen sprake van duidelijke uitloogpieken, noch van een tendens dat zink bij verhoogde temperaturen sneller wordt vastgelegd. De temperatuurverschillen zijn bij deze proeven echter veel kleiner dan in het laboratorium, terwijl ook meespeelt dat het materiaal in vak 3 nog niet volledig is gerijpt.

6. Ten opzichte van de beginwaarden is de arseenuitloging in alle vakken afgenomen, het minst in vak 3. Arseen wordt wellicht vastgelegd via oxidatie/precipitatie van ijzer en dit proces was in vak 3 nog niet volledig.
7. De koperuitloging is in alle vakken globaal verdubbeld, terwijl de uitloging van organische stof in alle vakken is afgenomen. Er is dus geen directe relatie tussen koper en organische stof, hoewel complexatie vaak het belangrijkste mechanisme is voor de uitloging van koper.

Minerale olie

In alle vakken treedt afbraak op van minerale olie, maar er zijn grote verschillen in zowel snelheid als eindkwaliteit. Het verloop van de afbraak is weergegeven in figuur 16. Het is duidelijk dat de afbraak in vak 2 snel op gang komt en aanvankelijk een min of meer lineair verloop heeft. Aan het eind van de rijpingsperiode neemt de afbraaksnelheid af, hoewel dit slechts op één meetpunt is gebaseerd. In de referentie gebeurt lange tijd niets, de afbraak begint pas na 20 weken op gang te komen. De eindwaarden van de referentie en vak 3 zijn vergelijkbaar, in vak 2 is duidelijk veel meer afbraak opgetreden.

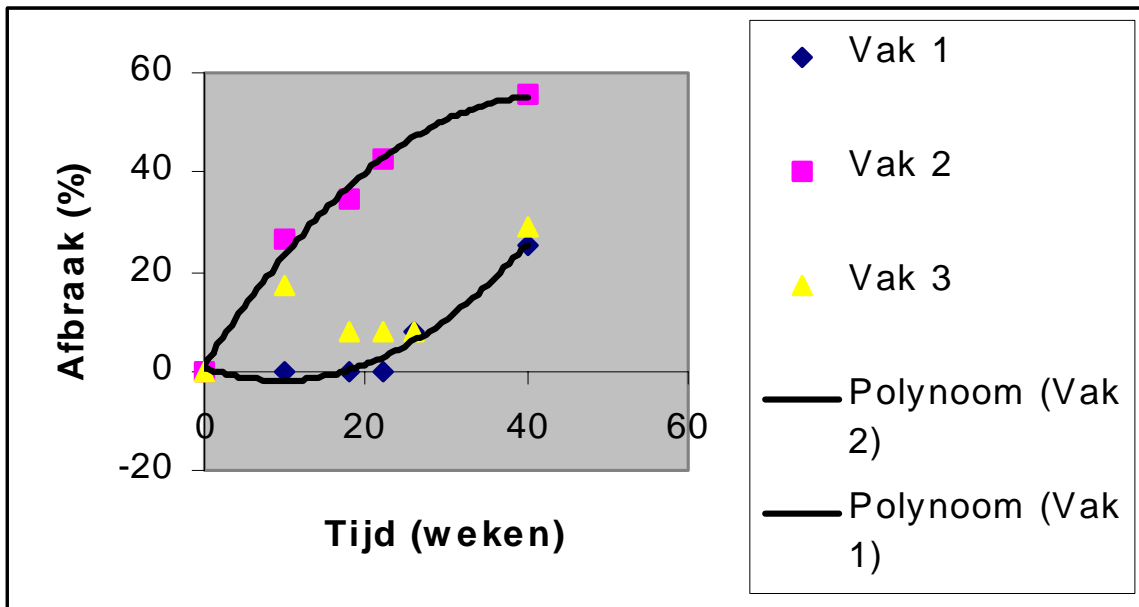


Fig. 16. Meetwaarden van de afbraak van minerale olie (in % t.o.v. beginwaarden) als functie van de rijpingstijd en regressielijnen (polynomen).

In tabel 24 is de afbraak opgesplitst naar enkele koolwaterstoffracties. Hieruit blijkt dat de afbraak van alle fracties in de referentie achterloopt bij die in het verwarmde vak 2. Zoals bekend verloopt de afbraak van zwaardere olie langzamer dan van lichte. De afbraakpercentages uit tabel 24 bevestigen dit. Gezien het verloop in figuur 16 is het aannemelijk dat de gehalten in beide vakken nog verder zullen dalen (zie verder 6.3.9).

Tabel 24. Afbraak van koolwaterstoffracties (als % van de beginwaarden).

koolwaterstoffractie	referentie	vak 2 (5 °C verhoogd)
C10 - C20	47	73
C20 - C32	26	55
C32 - C40	20	50

Overige componenten

De gehalten aan PAK's fluctueren, maar er is geen duidelijke trend te ontdekken (zie tabel 25). In geen van de vakken is een duidelijke afbraak opgetreden.

Tabel 25. Gehalten aan PAK (16 EPA) tijdens de rijping (in mg/kg ds).

week	16 EPA PAK		
	vak 1	vak 2	vak 3
0	14	21	15
10	13	13	12
18	15	15	12
22	16	15	15
26	23	19	14
38	17	22	18

PCB's zijn alleen in het begin- en het eindmateriaal geanalyseerd (zie tabel 26). In vak 1 en 2 zijn een aantal lichtere PCB's (28 - 118) afgenomen, terwijl de zwaardere zijn toegenomen. In vak 3 zijn met name de zwaardere afgenomen. Hoewel het aantal waarnemingen beperkt is, is het ook uit de literatuur bekend dat een aantal lichte PCB's aëroob afbreekbaar zijn, terwijl zwaardere PCB's anaëroob partieel gedechloriseerd worden en zodoende in lichtere PCB's worden omgezet. Het beeld van de proeven is hiermee in overeenstemming aangezien vak 3 aan het einde nog steeds gedeeltelijk anaëroob was. Als gecorrigeerd wordt voor de 'toename' van de zwaardere PCB's in de vakken 1 en 2 (dit is wellicht spreiding) worden de volgende afbraakpercentages gevonden voor de som van 6 PCB's⁶ in de vakken 1, 2 en 3: 30 %, 20 % en 26 %. Gezien het geringe aantal waarnemingen zijn de waarden indicatief. De betekenis is dat een beperkte afbraak van PCB's tijdens de rijping in elk geval niet uitgesloten is. Verder wijzen de gegevens erop dat verwarming geen stimulans vormt voor de afbraak. Dit wijst erop dat vervluchtiging niet de verklaring is voor de afname; vervluchtiging zal namelijk toenemen bij verhoging van de temperatuur.

Tabel 26. PCB-gehalten in baggerspecie, begin- en eindwaarden (in µg/kg ds).

PCB	vak 1 (referentie)		vak 2 (5 °C verhoogd)		vak 3 (10 °C verhoogd)	
	begin	eind	begin	eind	begin	eind
28	< 70	9	< 25	7	< 20	11
52	38	13	15	12	13	12
101	23	23	26	27	22	19
118	24	9	27	9	17	8
138	31	40	38	45	47	29
153	28	45	38	50	49	33
180	21	37	26	39	40	24
som 6	140	170	140	180	170	130
som 7	160	180	170	190	190	140

⁶ Dit is zonder PCB 28, omdat de waarden bij aanvang < detectiegrens zijn.

In het uitgangsmateriaal is de uitloging van *cyaniden* bepaald (totaal en vrij), maar omdat vrijwel alle waarden < detectiegrens waren, is cyanide niet meer geanalyseerd.

6.3.8 Overzicht van kwaliteitsveranderingen en toetsing aan het Bouwstoffenbesluit

De beginkwaliteit en eindkwaliteit van de baggerspecie is samengevat in tabel 27. Rekening houdend met een normale spreiding van minimaal +/- 10 % van de macrocomponenten en +/- 20 % van de microcomponenten worden de veranderingen als gevolg van rijping als volgt samengevat:

1. geen verandering: organische stof (wel in de uitloogbare fractie), PAK;
2. afname: kalk, minerale olie, ijzer, arseen, cadmium (toename in vak 3);
3. toename: droogrest, sulfaat, koper, zink, mangaan (vak 1 ongeveer constant);
4. mogelijk beperkte afname: PCB's.

Rekening houdend met het feit dat de onderlaag in vak 3 nog niet volledig is gerijpt, en met verschillen in beginconcentraties, zijn de effecten van rijping in de verschillende vakken in grote lijnen gelijk. Het materiaal uit vak 2 is wat droger en minerale olie is in vak 2 verder afgebroken dan in de andere vakken. In de verwarmde vakken is de koperuitloging hoger dan in de referentie, maar dit hangt samen met een hogere beginuitloging. De toename van koper is in alle vakken globaal een factor 2. Er zijn tussen de verwarmde vakken en het referentievak wel duidelijke verschillen in mangaanuitloging, die vooralsnog niet kunnen worden verklaard. Het algehele beeld is echter dat verwarming wel leidt tot versnelling van reacties (zie ook 6.3.9), maar op de langere termijn niet tot een andere eindkwaliteit.

Tabel 27. Begin- en eindkwaliteit van baggerspecie en normen Bouwstoffenbesluit [4] categorie 1 toepassing, hoogte 1 m ¹⁾.

parameter	vak 1 (referentie)		vak 2 (+5 °C)		vak 3 (+10 °C)		norm Bouwstoffenbesluit; categorie1; 1 m
	begin	eind	begin	eind	begin	eind	
vaste stof							
droogrest (%)	53,5	74,6	53,3	79,8	59,8	73,7	-
gloeiverlies (% van ds)	10	9	9	10	8	8	-
organische stof (% van ds)	7,5	7,7	7,3	7,7	5,9	6,4	-
CaCO ₃ (% van ds)	13	9,8	12	10	11	11	-
sulfaat (mg/kg ds)	(1800)	2170	320	1800	190	1350	-
minerale olie (mg/kg ds)	1300	970	1500	670	1200*	850	500
PAK 10 VROM (mg/kg ds)	10	13	16	17	12	14	40
PAK 16 EPA (mg/kg ds)	14	17	21	22	15	18	-
PCB's (som 7) (mg/kg ds)	0,16	0,12#	0,17	0,15#	0,19	0,14	0,5
uitloogvracht L/S 20							
arsen (mg/kg ds)	0,09	0,04	0,15	0,05	0,1	0,08	0,87
cadmium (mg/kg ds)	0,008	0,002	0,006	0,004	0,006	0,062	0,029
koper (mg/kg ds)	0,18	0,34	0,32	0,76	0,44	0,76	0,35
zink (mg/kg ds)	0,32	0,88	0,18	0,96	0,20	0,78	3,3
sulfaat (mg/kg ds)	(1440)	1580	640	1800	560	960	1120
ijzer (mg/kg ds)	0,56	< 0,3	0,72	< 0,3	2,6	0,9	-
mangaan (mg/kg ds)	0,92	0,7	0,24	3,2	0,28	6,4	-
DOC (mg/kg ds)	380	114	320	184	186	134	-
pH	7,2	6,5	7,3	6,7	7,2	7,1	-

¹⁾ Toetsing van de uitloogwaarden van metalen en sulfaat is indicatief, omdat deze zijn bepaald middels een schudtest en niet met de voorgeschreven kolomtest. Waarden tussen haakjes zijn uitschieters.

* Mengmonster van alle vakken, beginwaarde vak 3 is onjuist.

Deze waarden zijn gecorrigeerd voor 'toenames' van de hogere PCB's (zie 6.3.7 onder "Overige componenten"). De meetwaarden zijn 0,18 mg/kg ds in vak 2 en 0,19 mg/kg ds in vak 3.

Uit de toetsing aan het Bouwstoffenbesluit blijkt het volgende:

1. in de vakken 1 en 2 overschrijdt sulfaat de categorie 1 waarde van het Bouwstoffenbesluit in beperkte mate; na volledige rijping zal dit ook gelden voor vak 3;
2. in de vakken 2 en 3 overschrijdt koper de categorie 1 waarde, in vak 3 geldt dit ook voor cadmium;
3. minerale olie ligt in alle vakken nog boven de samenstellingsnorm; in vak 2 wordt deze echter al dicht benaderd en gezien het verloop van het gehalte is het aannemelijk dat de norm bij voortzetting van de rijping wordt bereikt (zie ook 6.3.9).

De overschrijding van koper is gezien de gebruikte testmethode niet zeker. Deze zou door middel van een kolomtest geïnterpreteerd moeten worden. De overige uitloogwaarden liggen dermate ver onder de normwaarden, dat zeker is dat hier ook met de kolomtest aan wordt voldaan.

Samenvattend geldt het volgende met betrekking tot de toepasbaarheid als bouwstof:

- a. op het moment van beëindiging van de proef is het materiaal uit alle proefvakken niet toepasbaar op basis van overschrijding van de norm voor minerale olie;
- b. bij voortzetting van de rijping is het aannemelijk dat de norm voor minerale olie wordt bereikt. Het is mogelijk om een categorie 2 bouwstof te produceren, waarbij sulfaat de kritische parameter is. Daarnaast zal koper mogelijk ook de categorie 1 norm overschrijden.

6.3.9 *Versnelling van de rijping door temperatuurverhoging*

Afgezien van een hoger droge stofgehalte is het aannemelijk dat de eindkwaliteit van de verwarmde specie op termijn niet anders is dan van het onverwarmde materiaal. Verwarming versnelt in principe alle rijpingsreacties. Afhankelijk van de vraag welke reactie beperkend is, kan het effect van verwarming in absolute zin verschillend zijn. In tabel 28 wordt het effect van verwarming op drie verschillende reacties geëvalueerd. Aangezien de normwaarde voor minerale olie nog niet is bereikt, moet een extrapolatie worden toegepast. Voor vak 2 wordt de afbraaksnelheid van het laatste deel van de curve doorgetrokken. Er is dan nog 13 weken nodig. Voor vak 1 is de volgende *benadering* gehanteerd:

1. In de winterperiode treedt blijkens praktijkwaarnemingen geen afbraak op. Verondersteld is dat in de periode half november tot half april de afbraak stagneert (21 weken).
2. De nog vereiste afbraak wordt op overeenkomstige wijze als bij vak 2 geëxtrapoleerd, waarbij ook rekening wordt gehouden met een verschil in het begingehalte van 200 mg/kg ds. In totaal is voor de afbraak dan nog 40 weken nodig.

Tabel 28. Benodigde tijdsduur voor het voltooien van een rijpingsreactie, in weken.

reactie	referentie	vak 2	referentie/vak 2
fysische rijping ¹⁾	33	21	1,6
zwaveloxidatie ²⁾	≤ 38	22	1,7
bereiken norm minerale olie ³⁾	circa 100	circa 53	1,9

¹⁾ De fysische rijping is gedefinieerd als een rijpingsfactor van 0,7 of lager.

²⁾ De zwaveloxidatie stabiliseert bij circa 33 % van totaal-S.

³⁾ Gebaseerd op extrapolatie van meetgegevens, zie tekst.

Uit tabel 28 blijkt dat de matige temperatuurverhoging in vak 2 globaal tot een versnelling van de rijpingsreacties met een factor 2 leidt. Voor de onderzoeksperiode geldt een gemiddeld temperatuurverschil van 4,3 °C. Bij een iets groter temperatuurverschil moet een versnelling met een factor 2 zeker haalbaar zijn. Van belang is verder welke reactie bepalend is voor de verblijftijd; in

dit geval is dat de afbraak van minerale olie. Daarmee is door verwarming een tijdwinst van circa 1 jaar te behalen.

6.3.10 *Vergelijking van de chemische rijping per laag*

Op 12 juli zijn de onder- en de bovenlagen afzonderlijk geanalyseerd. De resultaten hiervan zijn samengevat in tabel 29. Hieruit blijkt dat in de referentie en in vak 3 de rijping veel sterker laagsgewijs verloopt dan in vak 2. Het verschil in sulfaatgehalten tussen de boven- en onderlaag is in deze vakken een factor 2, in vak 2 is het een factor 1,6. Voor minerale olie geldt dat er zowel in vak 1 als vak 2 weinig verschil is tussen de lagen, maar dit wordt in vak 1 veroorzaakt omdat er vrijwel geen afbraak optreedt. In vak 2 treedt een gelijkmatige afbraak op en in vak 3 verloopt de afbraak in de bovenlaag sneller dan in de onderlaag. Uit de gegevens blijkt dus dat in vak 2 niet alleen de fysische rijping gelijkmatiger verloopt, maar ook de chemische rijping.

Tabel 29. Laagsgewijze analyse van sulfaat en minerale olie op 12-7-1999.

	vak 1 (referentie)	vak 2 (5 °C verhoogd)	vak 3 (10 °C verhoogd)
sulfaat (mg/kg ds)			
bovenlaag	1000	1700	1200
onderlaag	520	1100	610
verhouding boven/onder	1,9	1,6	2,0
minerale olie (mg/kg ds)			
bovenlaag	1500	840	780
onderlaag	1200	770	1100
verhouding boven/onder	1,2	1,1	0,7

6.3.11 *Verschillen tussen vak 2 en vak 3*

Ondanks een wat hogere temperatuur in vak 3, blijft de rijping achter bij vak 2. Gezien het beperkte verschil is het zeer onwaarschijnlijk dat de temperatuur op zichzelf remmend is. Na afloop is geconstateerd dat de bovenlaag van vak 3 sterk verkit is, waardoor deze als een soort deksel fungeert voor de onderlagen: vocht kan hierdoor niet ontsnappen en de onderste lagen blijven relatief nat, zelfs deels anaëroob. Omdat met name de temperaturen bovenin de vakken weinig verschillen, is de verwarming waarschijnlijk niet de oorzaak van de verkitting. Aannemelijker is dat verschillen in macrosamenstelling de oorzaak zijn. De specie in vak 3 zou dus gevoeliger zijn voor verkitting dan die in de andere vakken. In tabel 30 worden de waarden van de fracties < 2 µm en < 16 µm met elkaar vergeleken.

Tabel 30. Macrosamenstelling van de specie in verschillende vakken, eindanalyses (alle waarden in % van ds).

parameter	vak 1	vak 2	vak 3
gloeiverlies	9	10	8
oxideerbare organische stof	7,7	7,7	6,4
fractie < 2 µm:			
bovenlaag	11	10	11
middenlaag	11	12	11
onderlaag	12	14	8,9
gemiddelde	11,3	12	10,3
fractie < 16 µm:			
bovenlaag	21	19	19
middenlaag	19	19	19
onderlaag	20	22	15
gemiddelde	20	20	17,7

Hieruit volgen geen opmerkelijke verschillen. De specie in vak 3 heeft een iets grovere korrelverdeling, met name de onderste laag is zandiger (dit was ook visueel waarneembaar). Daarnaast is het organische stofgehalte in vak 3 maximaal 20 % lager dan in de andere vakken. Mogelijk is dit een betere verklaring voor de neiging tot verkitten in vak 3.

6.3.12 *Kwaliteit van het drainwater*

In verband met de beschikbaarheid van drainwater, konden alleen analyses worden uitgevoerd in vak 1 (de referentie). De resultaten hiervan zijn vermeld in tabel 31. Hieruit blijkt dat het drainwater zodanig verontreinigd is dat het moet worden gezuiverd. Dit geldt voor de componenten CZV, stikstof en enkele metalen. Afgezien van koper en zink is er geen sprake van een duidelijke afname van het verontreinigingsniveau in de loop van de tijd. De relatief hoge ijzerconcentratie en de lage redoxwaarde op 14 juni bevestigen dat het materiaal nog niet gerijpt is.

Tabel 31. Kwaliteit van het drainwater in vak 1.

parameter	24 maart	14 juni
CZV (mg O ₂ /l)	479	358
Kjeldahl-stikstof (mg N/l)	160	160
cyanide-totaal (µg/l)	14	13
totaal-S (mg/l)	190	13
ijzer (mg/l)	15	43
mangaan (mg/l)	7	5,5
arseen (µg/l)	6,0	3,0
cadmium (µg/l)	0,2	0,9
koper (µg/l)	260	75
zink (µg/l)	280	75
pH	7,0	7,1
EC (µS/cm)	2540	2860
Eh (mV)	111	17

6.3.13 *Energieverbruik*

Het energieverbruik was in de gehele onderzoeksperiode in vak 2 101 kWh/maand en in vak 3 198 kWh/maand (dit is exclusief de maand februari, toen de temperatuur door een niet goed werkende regeling veel te hoog is opgelopen). Er is dus een vrijwel lineair verband tussen de temperatuurverhoging en het energieverbruik, immers de temperatuur in vak 3 is ongeveer tweemaal zoveel verhoogd als in vak 2. Een vrijwel lineair verband tussen temperatuurverhoging en energieverbruik blijkt ook als de gegevens van verschillende maanden van vak 2 worden uitgezet (zie fig. 17).

Uit figuur 17 kan het volgende worden afgeleid:

1. De benodigde energie voor een temperatuurverhoging van gemiddeld 5 °C is $(0,9 \cdot 160) / 2 = 72$ kWh/m², maand. Hierbij is uitgegaan van een rendement van de omzetting van elektrische in thermische energie van 90 % en het depotoppervlak van 2 m².
2. Aangezien de meetgegevens afkomstig zijn uit de periode maart - augustus, moeten er grote verschillen in verdamping zijn geweest. Deze komen echter nauwelijks tot uiting in het energieverbruik. Het lijkt er daarom op dat het energieverbruik voor verdamping een ondergeschikte rol speelt en de warmtebehoefte primair wordt bepaald door geleidingsverliezen.

Bij de vertaling van deze waarde naar een praktijkdepot moet rekening worden gehouden met een opschaalfactor. Ondanks isolatie zullen de warmteverliezen in het proefdepot als gevolg van randeffecten aanzienlijk groter zijn dan in een praktijkdepot. Hierop wordt ingegaan in het volgende hoofdstuk.

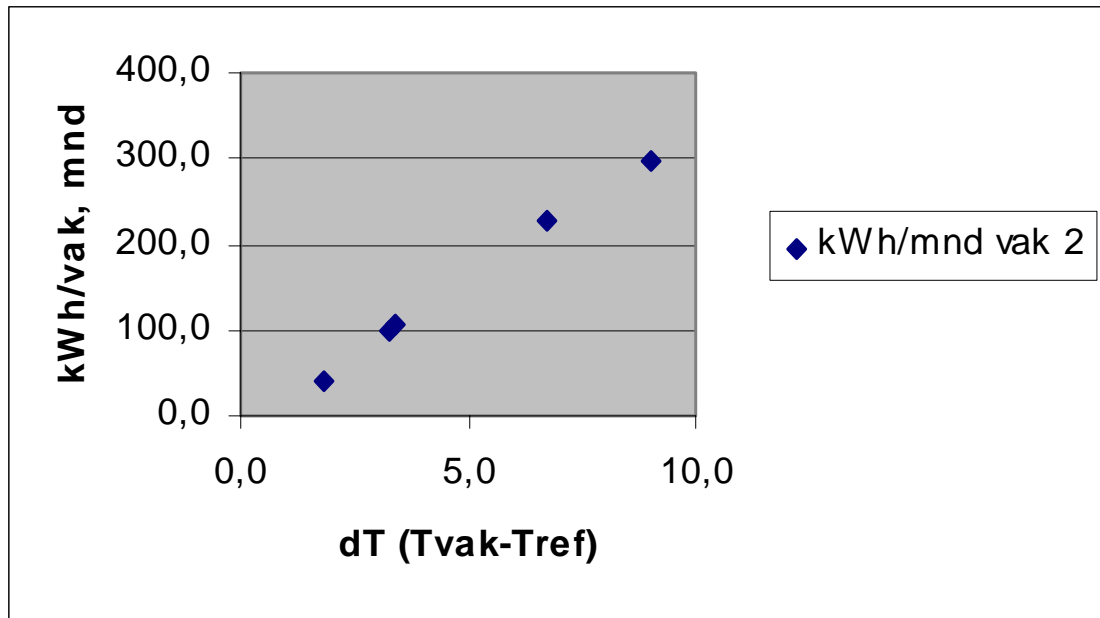


Fig. 17. Energieverbruik in vak 2 als functie van het temperatuurverschil met het referentievak (temperatuur halverwege de sliblaag), in verschillende maanden.

6.3.14 *Temperatuurverloop in de specielaag*

Op 4 november 1999 is het temperatuurprofiel in de specielaag van de drie proefdepots gemeten. Het resultaat hiervan is weergegeven in figuur 18.

In figuur 18 is te zien dat de temperatuur in de drainzandlaag constant is tot circa 10 cm onder de specielaag (daar liggen verwarmingskabels). Daarboven vindt zowel in het drainzand als in de specie een min of meer lineaire daling plaats van de temperatuur, met een afvlakking aan het oppervlak. Het afwijkende verloop in vak 3 is wellicht het gevolg van de aanwezigheid van een verkitten bovenlaag. De temperatuur op het grensvlak drainzand/specie was op het moment van meting circa 43 °C, hetgeen halverwege de specielaag in een temperatuurverhoging van ruim 8 °C ten opzichte van de referentie resulteert (dus meer dan de beoogde 5 °C).

Rekening houdend met een afstand tussen verwarmingsbuizen en specie van 20 cm, illustreert figuur 18 dat voor het bereiken van een gemiddelde opwarming van de specie met 5 °C (ten opzichte van de referentie) het water in de buizen niet warmer hoeft te zijn 55 °C.

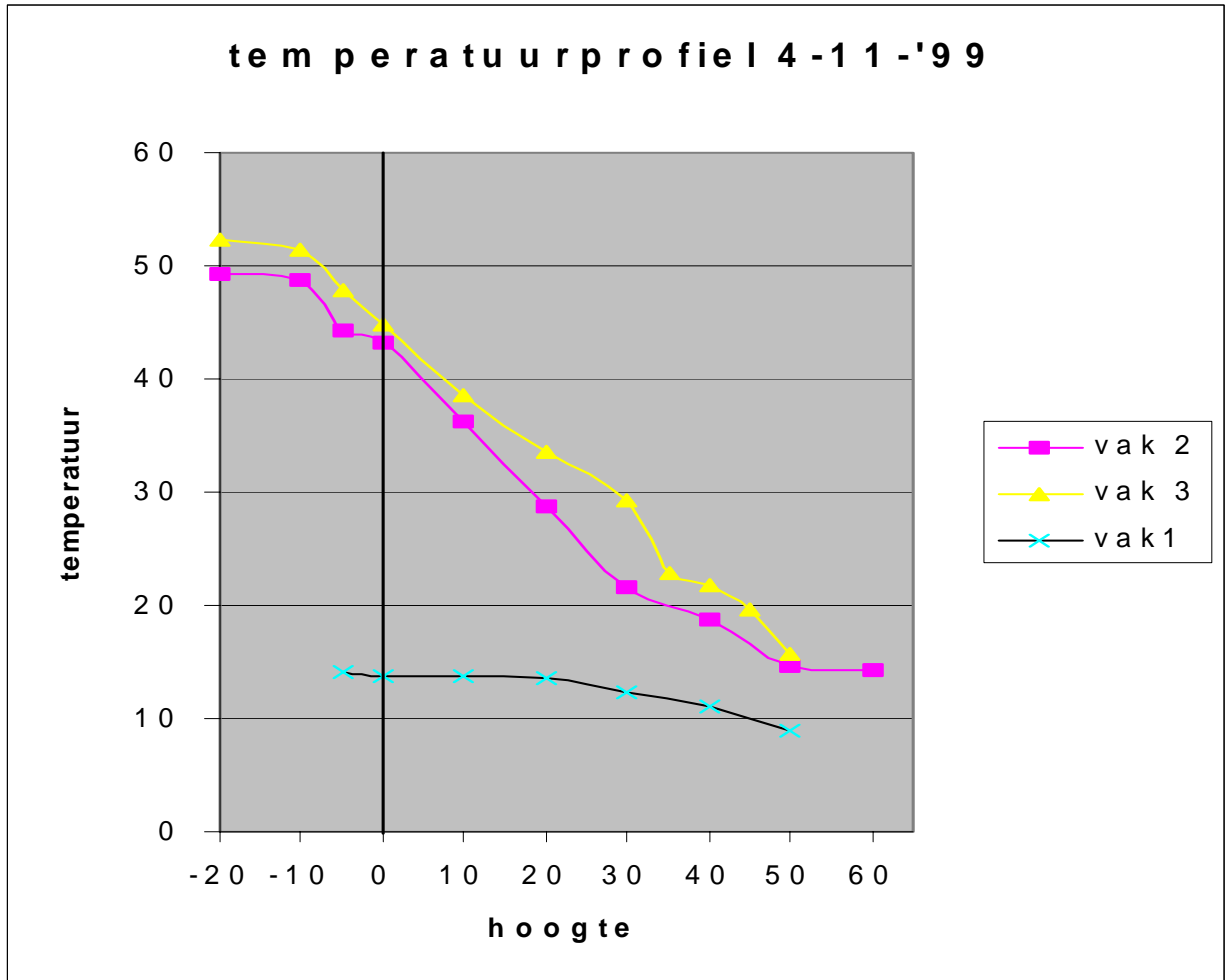


Fig. 18. Temperatuurprofiel in de proefvakken op 4 november 1999. Hoogte in cm ten opzichte van het grensvlak specie/drainzand, temperatuur in °C.

ONTWERP VAN EEN PRAKTIJKDEPOT EN KOSTENBEREKENING

7.1 Inleiding

De haalbaarheid van het concept voor grootschalige toepassing zal worden beoordeeld op basis van de eerder verkregen resultaten. Hierbij zijn te onderscheiden:

1. technische haalbaarheid;
2. economische haalbaarheid.

Na het opstellen van een modeldepotontwerp wordt ingegaan op de warmtevraag van het modeldepot en de uitvoering van het verwarmingssysteem. Op basis van deze gegevens is het mogelijk om een raming van de investeringskosten in het depot te maken en een exploitatieberekening uit te voeren. Uit de vergelijking van het modeldepot met versnelde rijping en het traditioneel ingerichte depot worden vervolgens conclusies getrokken inzake de haalbaarheid van de grootschalige toepassing van versnelde rijping van baggerspecie in de praktijk.

7.2 Depotontwerp

7.2.1 Inleiding

Om uitspraken te kunnen doen over de technische en economische haalbaarheid van het concept voor grootschalige toepassing van de versnelde rijping van baggerslib, zal een depotontwerp moeten worden gemaakt. Dit ontwerp zal vervolgens worden getoetst op technische haalbaarheid.

7.2.2 Modeldepot en aanbod van specie

Uitgegaan wordt van een modeldepot met een verwerkingscapaciteit van 25.000 m³ slib per jaar. Gekozen is voor een kleiige specie (minder dan 40 % zand) met een droge stofgehalte van circa 50 %. Gezien het lage zandgehalte is zandscheiding hierbij geen goede optie. Dit komt overeen met de specie die in de eerdere fasen van dit onderzoek gebruikt is bij de beproevingen, zodat de aldaar verkregen resultaten toepasbaar zijn in het kader van de haalbaarheidstoets.

Om zo goed mogelijk aan te sluiten bij de situatie in de praktijk zal in het depot klasse 2 tot en met klasse 4 specie worden verwerkt. Klasse 2 specie kan immers niet altijd ter plaatse van het baggeren worden toegepast. Specie afkomstig uit stedelijke gebieden zal bijvoorbeeld moeten worden afgevoerd naar een (verwerkings)depot. Klasse 3 en klasse 4 zullen op grond van het beleid altijd moeten worden afgevoerd naar een (verwerkings)depot. De klasse 3 specie wordt opgesplitst in specie ingedeeld op grond van het gehalte aan zware metalen en specie die is ingedeeld op grond van organische verbindingen (minerale olie en dergelijke).

Klasse 4 specie wordt gesplitst in 'kansrijk' en 'niet kansrijk'. Doordat de specie tijdens het baggeren en de verwerking kan worden gemengd met schoon bodemmateriaal en minder verontreinigde specie, zal de concentratie aan verontreinigingen in de specie enigszins dalen. Tevens zullen bij de droging/rijping van de specie verontreinigingen enigszins uitlogen en/of afbreken. Door deze effecten kunnen de verontreinigingen in de 'kansrijke' klasse 4 specie dusdanig afnemen dat uiteindelijk een toepasbaar materiaal resulteert. Dit geldt echter zeker niet voor alle klasse 4 specie, aangezien metalen tijdens de rijping niet afnemen.

De kwaliteitsverdeling van de specie die in het depot zal worden 'verwerkt' is weergegeven in tabel 32.

Tabel 32. Kwaliteit van de baggerspecie.

omschrijving	percentage	aandeel
	van totaal	in m ³ per jaar
klasse 2	25 %	6.250
klasse 3, zware metalen	20 %	5.000
klasse 3, organische verbindingen	30 %	7.500
klasse 4 (kansrijk)	5 %	1.250
klasse 4 (kansarm)	20 %	5.000
totaal	100 %	25.000

7.2.3 *Uitvoering en gevolgen bij de traditionele rijping*

Bij het traditionele proces wordt met name in het najaar gebaggerd en de specie in depot gebracht. Door de lage temperatuur in de winter en het voorjaar vindt in deze jaargetijden nauwelijks rijping plaats. De ontwatering van de specie in deze periode is sterk afhankelijk van de hoeveelheid neerslag, hoewel consolidatie wel optreedt. De rijping van de specie vindt echter voor het overgrote deel plaats in de zomerperiode (april tot en met oktober).

Bij de ontwatering spelen een drietal mechanismen een rol:

- Ontwatering door afstroming van water via het oppervlak van de specie. Deze vorm van ontwatering vindt met name direct na het inbrengen van de specie in het depot plaats. De specie bezinkt en consolideert onder het eigen gewicht. Hierdoor ontstaat aan de bovenzijde een waterlaag die via een slibkist wordt afgevoerd. Ook regenwater kan voor een groot deel oppervlakkig worden afgevoerd, tenzij sterke scheurvorming optreedt.
- Ontwatering door drainage via de onderzijde van de specie. Naarmate in de consolidatiefase de verdichting van de specie toeneemt, zal de doorlatendheid van de specie afnemen. De afvoer van water via de drainage zal tijdens deze fase dan ook verminderen. Met name bij kleiige specie kan de afvoer stagneren. Hierin komt verandering als krimpscheuren door de gehele dikte van het speciepakket ontstaan. Het regenwater zal dan door de krimpscheuren naar de drainagelaag stromen. Het water wordt dan vrijwel geheel via de drainagelaag afgevoerd in plaats van via het oppervlak van de specie.
- Ontwatering door verdamping. Onderzoek heeft aangetoond dat verdamping, vooral bij kleiige specie, verantwoordelijk kan zijn voor 80 % van de ontwatering. Het is daarom van belang het verdampingsproces zo snel mogelijk te starten. Een voorwaarde hiervoor is dat overtollig water tijdens en na het vullen van het depot, via afstroming en drainage snel wordt afgevoerd.

De snelheid waarmee specie zal ontwateren in depot is dus afhankelijk van de snelheid waarmee overtollig water kan worden afgevoerd, dikte van de specielaag, het type specie en de doorlatendheid van de specie. Globaal kan worden gesteld dat zandige specie in relatief korte termijn kan worden ontwaterd (termijn van enkele maanden). Voor kleiige specie kan globaal de ontwateringstijd worden berekend met de formule: tijd = hoogte^{1,5}. De tijd (jaren) is hierbij afhankelijk van de hoogte van de sliblaag (meters).

7.2.4 *Uitvoering en gevolgen bij de versnelde rijping*

Versnelde rijping van baggerspecie vindt plaats door het toevoeren van warmte aan de specie. Gestreefd zal hierbij worden naar een jaargemiddelde specietermperatuur van circa 15 °C. Dit is circa 5 °C warmer dan bij het traditionele rijpingsproces. De temperatuur onder in de specie zal hierbij moeten worden afgeregeld op ongeveer 30 °C. Uit de resultaten van de veldproef blijkt dat de rijpingsduur hierbij ongeveer wordt gehalveerd. Het depot zal dan in beginsel twee keer per jaar gevuld en ontgraven kunnen worden. Er kan dan worden volstaan met een kleiner depot en de baggeractiviteiten ten behoeve van doorgangdepots kunnen meer worden gespreid over het gehele jaar. Uiteraard is het ook mogelijk om de verwerkingscapaciteit van het depot te verdubbelen bij een gelijkblijvend depotoppervlak. De absolute tijdwinst van verwarming zal variëren per

speciesoort. Uit de veldproef blijkt een tijdswinst van circa 1 jaar, gebaseerd op de afbraak van minerale olie tot de normwaarde van het Bouwstoffenbesluit. In een andere specie kan de afbraak sneller verlopen, maar een versnelling met een factor 2 lijkt algemeen toepasbaar.

Bij de te onderzoeken verwarmingssystemen zal de warmtetoevoer van onderaf plaatsvinden. Hierbij zullen een tweetal systemen aan de orde komen:

- Een buizensysteem (vergelijkbaar met een kasverwarmingssysteem). Door een buizenstelsel in de ondergrond wordt warm water geleid met een temperatuur van circa 60 °C. De onderlinge afstand van de buizen bedraagt circa 80 cm of meer, afhankelijk van de warmtegeleiding van de specie. Om een goede warmtedoorgifte te krijgen, mag de zandlaag boven de buizen niet te dik zijn. Het buizenstelsel zal daarom op maximaal 20 cm diepte in de ondergrond van het depot moeten worden geplaatst. Door voornamelijk geleiding zal de warmte zich voortplanten in de specielaag, waarbij de onderlaag van de specie wordt opgewarmd tot circa 40 °C. Het buizenstelsel zal beschermd moeten worden tegen al te grote mechanische belastingen die bijvoorbeeld kunnen optreden bij het vullen en ontgraven van de depots met zwaar materieel. Toepassing van stelconplaten, waarop het materieel kan rijden, garandeert dat zich bij het ontgraven van de depots in normale omstandigheden geen beschadigingen van de buizen voordoen.
- Een foliesysteem. Dit systeem is opgebouwd uit twee lagen folie. Door tussen de folies zand aan te brengen en deze op regelmatige afstanden aan elkaar te 'lassen', worden kanalen gecreëerd waardoor het warme water kan stromen. Het voordeel van dit systeem is dat de gebruikte folie ondoorlatend is, zodat dit eveneens een goede onderafdichting van het depot zal geven. Naar verwachting is dan een extra folie voor de onderafdichting van het depot niet nodig. Opgemerkt wordt dat dit een nieuw systeem is dat zich in de praktijksituatie nog niet bewezen heeft. Uiteraard zal ook hier het foliesysteem beschermd moeten worden tegen al te grote mechanische belastingen en beschadigingen. Dit is net als bij het buizensysteem mogelijk door op circa 0,2 m boven de folie stelconplaten aan te brengen.

Ontwatering

Ontwatering van de specie zal bij de versnelde rijping via dezelfde mechanismen verlopen als bij de traditionele rijping. Zij het dat het percentage water dat via verdamping uit de specie verdwijnt groter zal zijn dan bij de traditionele rijping. Voor een beschrijving van de ontwateringsmechanismen wordt daarom verwezen naar 7.2.3. Een bijkomend effect van de verwarming is dat de plantengroei veel sneller op gang komt en veel uitbundiger is dan bij de traditionele rijping.

Uit de praktijkproef is gebleken dat in het referentievak circa 80 liter water per m³ slib via afstroming en drainage vrijkomt. Bij de verwarmde vakken was dit niet meer dan circa 5 liter per m³ slib. Bij het inbrengen bevatte de specie circa 53 % droge stof. Omdat het hier gaat om een eenmalig experiment met één bepaalde specie behoeven deze bevindingen niet algeheel te gelden. Een voorzichtige conclusie zou echter kunnen zijn dat circa 95 % of meer van het water bij versnelde rijping via verdamping uit de specie kan verdwijnen. Dit uitgangspunt zal dan ook gehanteerd worden bij de haalbaarheidstoets.

7.2.5 Uitgangspunten bij de dimensionering van de modeldepots

De uitgangspunten voor de dimensionering van de modeldepots zijn uiteengezet in tabel 33. In de tabellen 34 en 35 is vervolgens de indeling van het depot in deeldepots op basis van deze uitgangspunten vermeld.

Tabel 33. Uitgangspunten voor de dimensionering.

aspect	traditioneel depot	versnelde rijping
slibhoogte	1 meter	1 meter
verblijftijd in depot	1 jaar	0,5 jaar
netto-oppervlak depots	25.000 m ²	12.500 m ²
oppervlak deeldepots	circa 2500 (ca. 1500 - 3500) m ²	circa 2500 (ca. 1500 - 3500) m ²
aanleg	niet verdiept	niet verdiept
bodembeschermende voorzieningen	folie onder alle deeldepots, 0,2 - 0,5 m zand op folie als drainagelaag, geotextiel op 0,2 m boven de folie ('worteldoek') als signalering bij het ontgraven	folie onder alle deeldepots, circa 0,2 m zand als drainagelaag, stelconplaten op circa 0,2 m boven de folie, geotextiel onder de stelconplaten ('worteldoek')
centrale kade	1,1 m-mv, talud 1:1, kruinbreedte 4 m	1,1 m-mv, talud 1:1, kruinbreedte 4 m
tussen- en buitenkaden	1,1 m-mv, talud 1:1, kruinbreedte 2 m	1,1 m-mv, talud 1:1, kruinbreedte 2 m
sloot	2 m breed, 0,7 m diep	2 m breed, 0,7 m diep
waterafvoer uit deeldepots	grindkoffer in drainagelaag, minimaal 1 slibkist per 1000 m ² , waterafvoerpijp D 160 mm	grindkoffer in drainagelaag, minimaal 1 slibkist per 1000 m ² , waterafvoerpijp D 160 mm
waterafvoer (is maximaal vlak na het inbrengen)	via RWZI, tijdelijke opslag in waterdepot (1 dag buffercapaciteit max. afvoer)	via RWZI, tijdelijke opslag in waterdepot (1 dag buffercapaciteit max. afvoer)
wijze van verwarmen	geen	via een buizenstelsel (analoog aan kasverwarming), via een dubbelfoliesysteem (aangenomen wordt dat een extra folielaag als onderafdichting overbodig is)
kwaliteitsverbetering van de specie	zie 6.3	geen verschil met traditioneel; immers het proces verloopt tweemaal zo snel terwijl de tijdsduur gehalveerd is
ruimte voor voorzieningen (kantoor, wasplaats, stalling materieel, waterdepot, enz.)	0,25 hectare	0,25 hectare

Tabel 34. Indeling van het traditionele depot in deeldepots.

omschrijving	capaciteit (in m ³)	deeldepots (in m ²)	aantal
klasse 2	6.250	2.500	2
		1.250	1
klasse 3, zware metalen	5.000	2.500	2
klasse 3, organische verbindingen	7.500	2.500	3
klasse 4 (kansrijk)	1.250	1.250	1
klasse 4 (kansarm)	5.000	2.500	2
totaal	25.000	25.000*	11

* Het totaal is aantal deeldepots maal oppervlakte deeldepots.

Tabel 35. Indeling van het depot voor de versnelde rijping in deeldepots.

omschrijving	capaciteit (in m ³)	deeldepots (in m ²)	aantal
klasse 2	3.125	3.125	1
klasse 3, zware metalen	2.500	2.500	1
klasse 3, organische verbindingen	3.750	2.500	1
		1.250	1
klasse 4 (kansrijk)	625	625	1
klasse 4 (kansarm)	2.500	2.500	1
totaal	12.500	12.500	6

7.2.6 Afvoer van het water

Het water dat vrijkomt in de depots is deels afkomstig van het ingebrachte slib en deels afkomstig van neerslag. Aangezien ontwatering plaatsvindt via afstroming, drainage en verdamping zal slechts een deel van het water moeten worden afgevoerd via de sloten. Uitgegaan wordt van een lozing van het afvalwater op een rioolwaterzuiveringsinstallatie (RWZI). Lozing van het afvalwater op het oppervlaktewater is immers verboden, tenzij de waterkwaliteitsbeheerder hiervoor een lozingsvergunning heeft verleend. Opgemerkt wordt dat deze vergunning niet zonder meer zal worden verleend.

Maximale waterstroom

Voor het dimensioneren van de voorzieningen is het belangrijk om te weten welke hoeveelheden afvalwater het betreft en met name de maximaal te verwachten stromen. Lozing van zeer grote hoeveelheden water afkomstig uit het slib zal bijvoorbeeld in natte perioden met veel regenval op bezwaren kunnen stuiten. De RWZI wordt dan namelijk hydraulisch zwaar belast, zodat buffercapaciteit nodig is voor het afvalwater.

De maximaal te verwachten waterstroom zal vooral optreden in de dagen vlak nadat het depot gevuld is. Hierbij zijn de volgende stromen te onderscheiden:

1. Water afkomstig uit het ingebrachte slib. De opslagcapaciteit van het depot bedraagt 25.000 m³ (traditioneel) respectievelijk 12.500 m³ (versnelde rijping), waarbij het slib een droge stofgehalte heeft van circa 53 %. De hoeveelheid water in het depot bedraagt daarmee maximaal 0,47 m³ per m². Als benadering wordt aangenomen dat circa 25 % van het water vrijkomt in de eerste drie dagen nadat het slib is ingebracht. Dit komt neer op 0,039 m³/m² per dag ofwel 39 mm per dag.
2. Water dat door drainage wordt afgevoerd. Verwacht mag worden dat afstroming hierbij nauwelijks een rol zal spelen. Als vuistregel geldt hierbij dat de stationaire regenwaterafvoer voor een bouwland (voorzien van drains op 1 m diepte, afhankelijk van de bodemopbouw, grondwaterstand e.d.) circa 7 mm per dag bedraagt. De hoeveelheid drainagewater bij het depot met versnelde rijping zal verwaarloosbaar zijn.

De maximale waterafvoer zal dus kunnen optreden vlak nadat het depot gevuld is en bedraagt daarmee 46 mm en 39 mm per dag voor respectievelijk het traditionele depot (1150 m³ per dag) en het depot met versnelde rijping (490 m³ per dag).

Gemiddelde waterstroom

Uit de eerdere hoofdstukken blijkt dat per jaar circa 400 mm water afkomstig van de specie uit een traditioneel depot moet worden afgevoerd. Daarnaast valt per jaar circa 750 mm regen. In totaal dus 1150 mm (circa 29.000 m³ op jaarbasis), waarvan circa 80 % van het water verdampt; 230 mm water zal worden afgevoerd via afstroming en drainage. Dit komt bij een depotoppervlak van 25.000 m² neer op circa 5800 m³ per jaar.

Het depot voor de versnelde rijping wordt twee keer per jaar gevuld. Op jaarbasis zal daarmee $2 \cdot 400 + 750 = 1550$ mm water worden afgevoerd overeenkomend met circa 19.400 m^3 per jaar. Afgezien van het water in de eerste drie dagen na het inbrengen van de specie, zal nauwelijks water via afstroming en de drainage worden afgevoerd. Aangenomen wordt dat circa 95 % van het water verdampt ofwel circa 18.350 m^3 per jaar. Circa 970 m^3 zal dus per jaar worden afgevoerd via afstroming en drainage.

7.2.7 Depotontwerp

Van beide modeldepots is een globaal ontwerp gemaakt. Beide ontwerpen zijn opgenomen in bijlage D. Het totaal benodigde oppervlak voor het traditionele depot bedraagt circa 3,67 hectare en het oppervlak voor het depot met versnelde rijping bedraagt circa 1,91 hectare.

7.2.8 Menskracht en materieel

De inzet van materieel ten behoeve van de op- en overslag van aangevoerde en verwerkte baggerspecie, het gebruiksklaar maken en het onderhoud van de locatie alsmede de processturing is in tabel 36 samengevat. De inzet van personeel is in tabel 37 weergegeven.

Tabel 36. Inzet van materieel tijdens de exploitatiefase van het depot.

fase	materieel	traditioneel	versnelde rijping
ontgraven en onderhoud van depots voor drogen/rijpen en scheiden	hydraulische graafmachine	1	1
(intern) transport van specie en product	vrachtwagen	2	1+

Tabel 37. Inzet van personeel tijdens de exploitatiefase verwerkingslocatie.

functie	traditioneel	versnelde rijping	werkzaamheden
toezichthouder	1	1	- controle van de procesapparatuur - procesbewaking - bewaking van de veiligheid van de locatie - in- en uitklaring van de specie - administratie
vrachtwagenchauffeur	2	1+	- (eventueel)aanvoer van de specie - afvoer van het product
kraanmachinist	1	1	- besturing van het materieel tijdens op- en overslag en verwerking van de specie - sturing van processen - onderhoud van materieel en depots

De inzet van mens en materieel is niet gelijkmatig verdeeld over het gehele jaar. Met name bij het traditionele depot is dit sterk afhankelijk van het seizoen. In de herfst wordt bijvoorbeeld het depot gevuld en heerst er een topdrukke, terwijl er in de winter en het voorjaar nauwelijks activiteiten plaatsvinden.

Bij het depot voor versnelde rijping zal de omvang van de werkzaamheden in principe vergelijkbaar zijn met die in het traditionele depot. Zij het dat deze werkzaamheden beter gespreid zijn over het gehele jaar waardoor de piekbelastingen minder groot zijn. Wellicht kan hierdoor worden volstaan met één vrachtwagen gedurende een deel van de tijd. Het inhuren van mensen en materieel van bijvoorbeeld een loonwerker zou hier een oplossing voor zijn. Hierdoor kan immers zeer flexibel worden ingespeeld op de wisselende drukke en omstandigheden in het depot. De toezichthouder is wel in loondienst en kan tevens een deel van de onderhoudswerkzaamheden in het depot verrichten.

Inzet van het materieel

Een vrachtwagen kan circa 20 m³ baggerspecie per keer vervoeren; in totaal zijn dus 1250 aanvoerbewegingen per jaar voor de specie nodig.

De hoeveelheid product bedraagt voor de versnelde rijping circa:

$$25.000 \text{ m}^3 \cdot 0,53 \text{ (ds specie)} \cdot 1,2 \text{ (sg specie)} / 0,8 \text{ (ds product)} = 19.900 \text{ ton}$$

Het droge stofgehalte van het product van de traditionele rijping is iets lager, namelijk 75 %. Daarmee valt de hoeveelheid product iets hoger uit, namelijk 21.200 ton.

Van het product kan circa 30 ton per keer worden vervoerd. Hiervoor zijn dus in totaal circa 660 respectievelijk 707 vrachtwagenbewegingen nodig.

Als gerekend wordt met circa 1 uur per rit (dit is in de praktijk uiteraard sterk afhankelijk van de ligging van het depot ten opzichte van het baggerwerk en de plaats waar het product naar afgevoerd wordt) zou 1910 uur respectievelijk 1960 uur (238 respectievelijk 245 werkdagen) een vrachtwagen moeten worden gehuurd. Omdat het aangevoerde slib onder andere door een kraan in de depots wordt verspreid en de kraan nodig is voor het laden van het product op de vrachtwagen, zal op de tijdstippen dat gewerkt wordt met een vrachtwagen eveneens een kraan aanwezig moeten zijn. Er wordt veelal gewerkt met twee vrachtwagens tegelijk, dus zal er circa 1000 uur (125 dagen) een kraan nodig zijn.

7.3 Warmtevraag bij versnelde rijping

Uit de resultaten van de veldproef komt naar voren dat een matige verwarming, waarbij de temperatuur onder in de specie circa 30 - 40 °C bedraagt, in een halvering van de rijpingsduur resulteert. Dit betekent dat verwarming perspectief heeft mits de temperatuur van de specie voldoende hoog gehouden kan worden. Voor de economische haalbaarheid is het hierbij eveneens van belang hoeveel warmte aan de specie moet worden toegevoerd.

Een nadeel bij de versnelde rijping is dat de drainage van water minder is en dat daarmee het aandeel verdamping groter is dan in het traditionele depot. Dit kan in elk geval voor een groot deel worden ondervangen door de eerste consolidatie, waarbij veel water uittreedt, te laten plaatsvinden zonder verwarming. De verwarming zou dan één of twee weken na het vullen van het depot kunnen worden aangezet.

Voor de technische haalbaarheid is het met name van belang om te weten of de warmtestromen nog overdraagbaar zijn en/of de stromen warmteoverdragend medium hierbij nog hanteerbaar zijn. Ook hiervoor is inzicht in de warmtevraag nodig.

7.3.1 Verwarmingsmedium

Uit hoofdstuk 5 volgt dat in de zomerperiode koelwater van elektriciteitscentrales met een temperatuur van 30 °C kan worden gebruikt voor de opwarming van de baggerspecie. De gewenste versnelling van de rijping met een factor 2 kan hiermee echter waarschijnlijk niet worden gehaald. In de winterperiode is de temperatuur van het koelwater te laag (20 °C) en zal bijwarming nodig zijn. Uitgegaan wordt daarom van bijwarming van het verwarmingsmedium (water) door middel van lagedrukstoom (LD-stoom) tot een temperatuur van 60 °C.

Uit praktisch oogpunt is het eenvoudigste om een gesloten watercircuit in het depot aan te leggen en de LD-stoom van de elektriciteitscentrale te betrekken. De kosten voor deze laagwaardige stoom bedragen *f* 5,- à *f* 6,- per ton, hetgeen overeenkomt met 2 GJ warmte-inhoud. De

stoom kan door middel van een goedgeïsoleerde leiding naar een warmtewisselaar worden getransporteerd. Hierin wordt vervolgens het retourwater van het depot opgewarmd tot 60 °C. In figuur 19 is een en ander schematisch weergegeven.

De warmtetoevoer aan de specie is goed regelbaar door toepassing van een toerengeregelde pomp in het verwarmingssysteem. Overigens zal het warmwaterdebiet voldoende groot moeten zijn, opdat de temperatuur van het water in het systeem niet al te veel daalt. Hiermee worden al te grote temperatuurverschillen over het speciebed voorkomen.

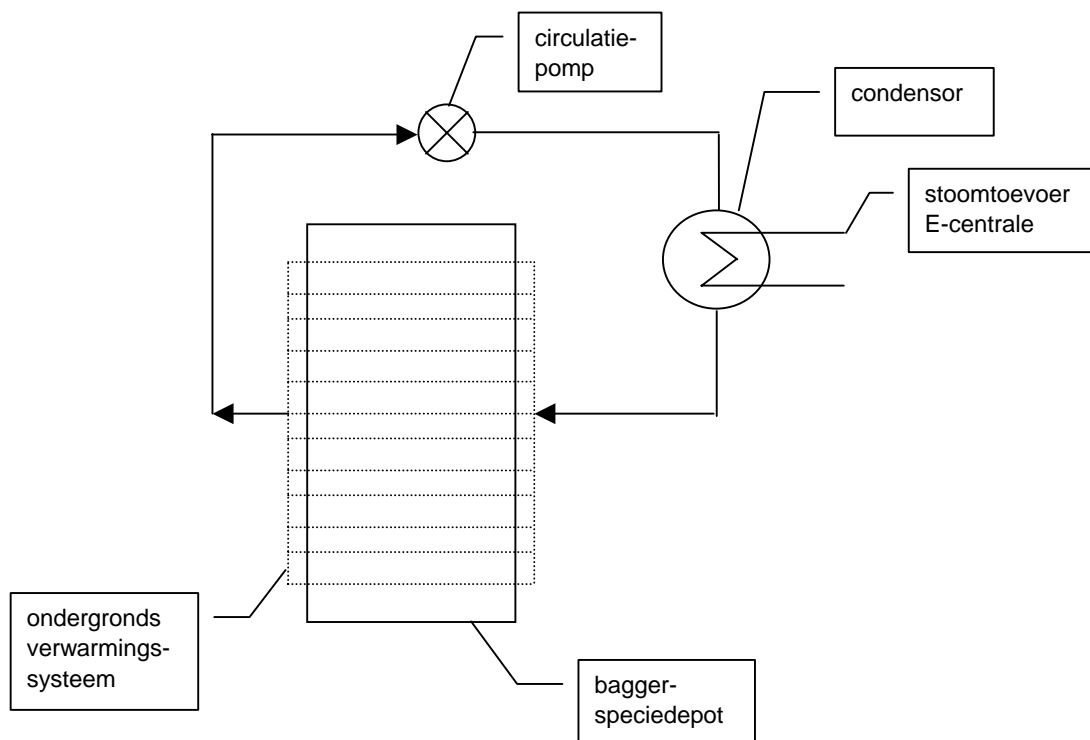


Fig 19. Opzet van het verwarmingssysteem.

7.3.2 Warmtevraag en warmtestromen

De warmtevraag is op te splitsen in 3 posten:

1. opwarming van de specie tot de juiste temperatuur (initiële warmtevraag);
2. warmte die nodig is voor de verdamping van het water;
3. warmte die nodig is om verliezen naar de omgeving te voorkomen.

Voor alle posten geldt dat er een afhankelijkheid is van de weersomstandigheden en het seizoen. Omdat met name temperaturen en neerslaghoeveelheden sterk variëren per seizoen, per week en zelfs per dag, is het niet mogelijk om de warmtestromen exact te kwantificeren. Volstaan wordt daarom met een indicatie van de warmtestromen zoals deze in hoofdstuk 5 zijn bepaald. De waarden zijn weergegeven in tabel 38.

Tabel 38. Indicatieve warmtebehoefte voor het opwarmen, verdampen en instandhouden van de temperatuur in een baggerspeciebed in MJ/m² per depotoppervlak per cyclus.

specietemperatuur en seizoen	initiële opwarming	verdamping van water	geleidingsverliezen
15 °C, zomer	0	> 0	0
15 °C, winter	29	1240	314

De specietemperatuur zal door de eerder geschetste effecten niet constant zijn. Wel kan gezegd worden dat, bijvoorbeeld bij doorstroming van het verwarmingssysteem met water van 60 °C, de temperatuur van de specie onder in het depot circa 30 - 40 °C is.

De gemiddelde specietemperatuur zal circa 5 °C hoger moeten zijn dan in een traditioneel proces om het rijpingsproces met een factor 2 te versnellen. Uit de praktijkproef blijkt daarbij dat de warmtebehoefte slechts een beperkte afhankelijkheid vertoont van de verdampingssnelheid en een redelijke samenhang vertoont met het temperatuurverschil ten opzichte van het referentievak. Hieruit zou kunnen worden geconcludeerd dat een aanzienlijk deel van de energie, die nodig is voor de verdamping, wordt onttrokken aan de lucht.

Uit de proef is ook gebleken dat de geleidingsverliezen hoger zijn dan verwacht: circa 1550 MJ per m² per cyclus. Wellicht is dit te wijten aan warmteverliezen door de wanden van het proefvak. Door het beperkte oppervlak van het proefvak (2 m²) zal het randeffect veel groter zijn dan in een groot depot in een praktijksituatie.

De warmtebehoefte zal worden berekend voor een tweetal situaties:

1. Worst case: alle warmte voor de verdamping wordt in de winter geleverd door de verwarming. Het verbruik in de wintersituatie is daarmee circa 1580 MJ/m². In de zomercyclus wordt deze geraamd op de helft van de verdampingswarmte, circa 620 MJ/m².
2. Circa 50 % van de warmte, die nodig is voor de verdamping, wordt in de winter geleverd door de verwarming. In de zomer is geen extra verwarming nodig.

De totale warmtebehoefte van het depot is daarmee voor situatie 1 in de zomercyclus circa 620 MJ/m² ofwel 7.750.000 MJ en in de wintercyclus 1580 MJ/m² ofwel 19.800.000 MJ. Het LD-stoomverbruik in de zomer komt daarmee op 3900 ton en in de winter 9900 ton, in totaal per jaar in situatie 1 dus 13.800 ton.

De totale warmtebehoefte in situatie 2 is in de zomercyclus 0 MJ/m² en in de wintercyclus 963 MJ/m² ofwel 12.000.000 MJ. Het LD-stoomverbruik in de winter (en dus per jaar) komt daarmee op 6000 ton.

Uitgaande van een gemiddeld stoomverbruik in de winterperiode van 2,3 ton per uur (situatie 1), zou kunnen worden volstaan met een condensor met een warmteoverdragend oppervlak van 20 m². In de praktijk zal de stoomvraag niet constant zijn maar variëren, afhankelijk van de temperatuur. Door een condensor met een oppervlak van 50 m² te kiezen, wordt een redelijke veiligheidsmarge ingebouwd.

7.3.3 Dimensionering van het verwarmingssysteem

In de wintercyclus is de warmtevraag het grootst, zodat het systeem moet worden gedimensioneerd op dit seizoen.

De 20.000 GJ (afgerond) komt overeen met een warmtevraag per seconde van:

$$20.000.000 \cdot 10^6 \text{ J} / (6 \text{ maanden} \cdot 30 \text{ dagen} \cdot 24 \text{ uren} \cdot 3600 \text{ sec}) = 1,3 \text{ MJ}$$

Dit komt neer op een warmwaterdebiet van $1,3 \cdot 10^3 \text{ kJ} / (4,2 \text{ kJ/}^\circ\text{C,kg} \cdot [60 \text{ }^\circ\text{C} - 55 \text{ }^\circ\text{C}]) = 62 \text{ kg}$ per seconde. Het temperatuurverschil tussen de ingaande en uitgaande waterstroom is hierbij op maximaal 5 °C gesteld om al te grote temperatuursverschillen over het bed te voorkomen.

De breedte van alle deeldepots tezamen bedraagt 250 meter bij een bedlengte van 50 meter. De waterstroom bedraagt daarmee 0,25 liter per m bed per seconde, ofwel 0,9 m³ per m bed per uur. Als de buizen (uitwendige diameter 0,11 m, inwendige diameter 0,0974 m) met een onderlinge afstand van 1 meter in het bed worden aangebracht, komt dit overeen met een stroomsnelheid van ongeveer: debiet/doorstroomd oppervlak = $0,25 \cdot 10^{-3} / (\pi/4 d_i^2) = 0,034 \text{ m/s}$, ofwel circa 3,5 cm/s.

De bovenstaande waarden zijn in de praktijk goed te realiseren, zeker als wordt gekozen voor het buizenverwarmingssysteem.

Opgemerkt wordt wel dat de waarden berekend zijn gemiddeld over het gehele winterseizoen. Met name in de beginfase zal veel warmte nodig zijn om het speciebed op te warmen tot de juiste temperatuur. De temperatuur van het uitgaande water zal daarom veel lager liggen dan de aangenomen 55 °C, waardoor in de praktijk veel meer warmte wordt overgedragen dan de eerder genoemde 1,3 MJ. Bijvoorbeeld bij een uitgangstemperatuur van 30 °C zou circa 11 MJ kunnen worden overgedragen. Bij de dimensionering van de capaciteit van de stoomcondensor zal met dit effect dus rekening moeten worden gehouden. Hieraan wordt al deels tegemoetgekomen door de overdimensionering van de condensor met een factor 2,5.

De verwarming van depots, die niet in gebruik zijn, kan in beginsel worden uitgezet. Dit is mogelijk door het buizenstelsel onder te verdelen in secties die apart geschakeld kunnen worden met kleppen. Gezien de afstand die de buizen onder het oppervlak liggen als er geen specie in het depot zit, bestaat de kans op bevriezing in de winter. Er zal daarom altijd een kleine waterstroom door de afgeschakelde secties moeten worden geleid om deze vorstvrij te houden.

Het rendement van de verwarming zou kunnen worden verhoogd door onder de folie voor de onderafdichting een laag isolatiemateriaal aan te brengen. Hiervoor zouden schuimplaten geschikt zijn die als vloerisolatie in gebouwen worden toegepast. Doordat het gehele verwarmingssysteem door stelconplaten wordt beschermd tegen mechanische belastingen van het rollend materieel, is de belasting hiervan immers gering.

7.4 Investeringen

7.4.1 Grondbeslag

Versnelde rijping van baggerspecie is een reële optie als er voldoende aanbod is van goedkope restwarmte. Daarnaast is er ruimte nodig voor de aanleg van het depot, zij het dat het oppervlak circa de helft is van een traditioneel depot.

De aanleg van een depot voor de versnelde rijping van baggerspecie in de nabijheid van een elektriciteitscentrale zou daarmee een ideale combinatie zijn. In het algemeen zal het nieuwe gebruiksdoel van de grond moeten concurreren met het oude gebruiksdoel (meestal landbouw). Om in aanmerking te komen voor een bouwvergunning zal de bestemming van de grond waarschijnlijk dan ook moeten worden gewijzigd tot 'verwerking van baggerspecie' of 'afvalverwerking' of iets van gelijke strekking. Opgemerkt wordt dat in het kader van dit onderzoek geen zaken zoals een eventuele aanpassing van het bestemmingsplan, bouw-, milieu- en/of lozingsver-

gunningen worden meegenomen. Vanzelfsprekend zal hieraan wel de nodige aandacht moeten worden besteed in de planfase van een depot.

Mede gezien de benodigde investeringen zal de grond langdurig aan het oude gebruiksdoel worden onttrokken. Koop of erfpacht van de grond biedt hiermee de meeste zekerheid. Eenvoudigheidshalve wordt hier uitgegaan van de aankoop van de grond.

De prijs per m² is sterk afhankelijk van plaats in Nederland waar het terrein is gelegen, de specifieke ligging ten opzichte van wegen en waterwegen alsmede het 'oude' gebruiksdoel. Omdat de vestigingsmogelijkheden van het depot beperkt zijn tot de nabije omgeving van elektriciteitscentrales zal de grondprijs over het algemeen iets hoger liggen dan de prijs van landbouwgrond, maar iets lager dan de prijs van industriegrond. Gerekend wordt daarom met een 'worst case' investering van circa f 100,- per m².

Het totaal benodigde oppervlak voor het depot met versnelde rijping bedraagt circa 1,91 hectare. De investering in de grond bedraagt daarmee dus f 1.910.000,-.

Het traditionele depot is net als het depot voor versnelde rijping gebaat bij een goede bereikbaarheid. De grondprijs zal dus vergelijkbaar zijn, ofwel circa f 100,- per m².

Bij een totaal benodigde oppervlak van circa 3,67 hectare bedraagt de investering daarmee f 3.670.000,-.

7.4.2 *Aanlegkosten van het depot*

De aanlegkosten van het traditionele depot bestaan voornamelijk uit:

- het grondverzet en de levering van schoon zand voor de drainagelaag;
- het aanbrengen van de folie voor de onderafdichting en het worteldoek;
- het aanbrengen van de voorzieningen voor de afvoer van het water uit de depots;
- de uitvoeringskosten, algemene kosten en dergelijke.

Bij het depot voor de versnelde rijping komen daar nog bij:

- het aanbrengen van het verwarmingssysteem met toebehoren, zoals circulatiepompen en de stoomcondensor;
- in verband met de warmteweerstand zal de laag drainagezand zo dun mogelijk moeten worden gehouden; hierdoor is extra bescherming nodig tegen mechanische beschadiging van het buizen- of dubbelfoliesysteem in de vorm van bijvoorbeeld stelconplaten;
- omdat de laag drainagezand dunner kan worden gehouden, is minder grondverzet en aanvulzand nodig;
- bij het verwarmingssysteem met dubbelfolie is aangenomen dat een extra folielaag ten behoeve van de onderafdichting niet nodig is.

In bijlage E zijn investeringsberekeningen opgenomen voor een drietal varianten. Dit zijn:

- het traditionele depot;
- een depot met verwarming met behulp van een buizenstelsel;
- een depot met verwarming door middel van het dubbelfoliesysteem.

Bij de berekeningen is uitgegaan van de modeldepots zoals deze in 7.2 en 7.3 gedimensioneerd zijn.

Uiteraard wordt de uitvoering van een depot in de praktijk zeer sterk bepaald door locatiegebonden aspecten en factoren. Bijvoorbeeld de kwaliteit en de doorlaatbaarheid van de onder-

grond, de eventuele verdiepte aanleg van een depot, grondprijs en dergelijke. De investeringsberekening moet dan ook worden gezien als een middel om de gekozen varianten onderling te kunnen vergelijken. De berekening moet niet worden gezien als een 'prijsopgave' voor de desbetreffende depotvariant.

Het blijkt dat de investeringskosten (exclusief de grond) in de drie varianten redelijk vergelijkbaar zijn. Het onderlinge verschil in investeringen in de depots met versnelde rijping komt vrijwel geheel doordat bij het dubbelfoliesysteem geen extra onderafdichting met een folielaag is opgevoerd. Als het grotere grondbeslag van het traditionele systeem in de beschouwing wordt meegenomen, is de totale investering in dit systeem aanzienlijk groter. In tabel 39 is een en ander samengevat.

Tabel 39. Resultaten van de investeringsberekeningen.

aspect	traditioneel	verwarming met een buizenstelsel	verwarming met een dubbelfoliesysteem
totaal oppervlak deeldepots	25.000 m ²	12.500 m ²	12.500 m ²
investeringen in het depot	circa f 1.540.000,-	circa f 1.720.000,-	circa f 1.560.000,-
% van investeringen:			
- grondverzet	29 %	7 %	8 %
- bodembescherming	24 %	27 %	20 %
- verwarmingssysteem	-	22 %	24 %
- apparatuur	1 %	7 %	8 %
- overig ⁷	46 %	37 %	40 %
grondkosten	f 3.670.000,-	f 1.910.000,-	f 1.910.000,-
totaal investeringen	f 5.210.000,-	f 3.630.000,-	f 3.470.000,-

Om de invloed van de grondprijs in kaart te brengen, is de investeringsberekening herhaald met een lagere grondprijs. Mocht een groot stuk grond beschikbaar zijn met beperkte gebruiksmogelijkheden dan zal de prijs aanmerkelijk lager liggen dan de eerder gestelde prijs; f 25,- per m² lijkt dan meer op zijn plaats. In tabel 40 zijn de consequenties hiervan vermeld. In figuur 20 is het verband tussen de grondprijs en de totale investeringskosten in het depot weergegeven. Zoals verwacht, nemen de verschillen in de investeringskosten tussen de varianten af als de grondprijs daalt.

Tabel 40. Resultaten van de investeringsberekeningen bij een grondprijs van f 25,- per m².

aspect	traditioneel	verwarming met een buizenstelsel	verwarming met een dubbelfoliesysteem
investeringen in het depot	f 1.540.000,-	f 1.720.000,-	f 1.560.000,-
grondkosten à f 25,- per m ²	f 917.500,-	f 477.500,-	f 477.500,-
totaal investeringen	f 2.457.500,-	f 2.197.500,-	f 2.037.500,-

⁷ De overige kosten bestaan voornamelijk uit de voorbereidings- en uitvoeringskosten, algemene kosten en eenmalige kosten ten behoeve van de bouw.

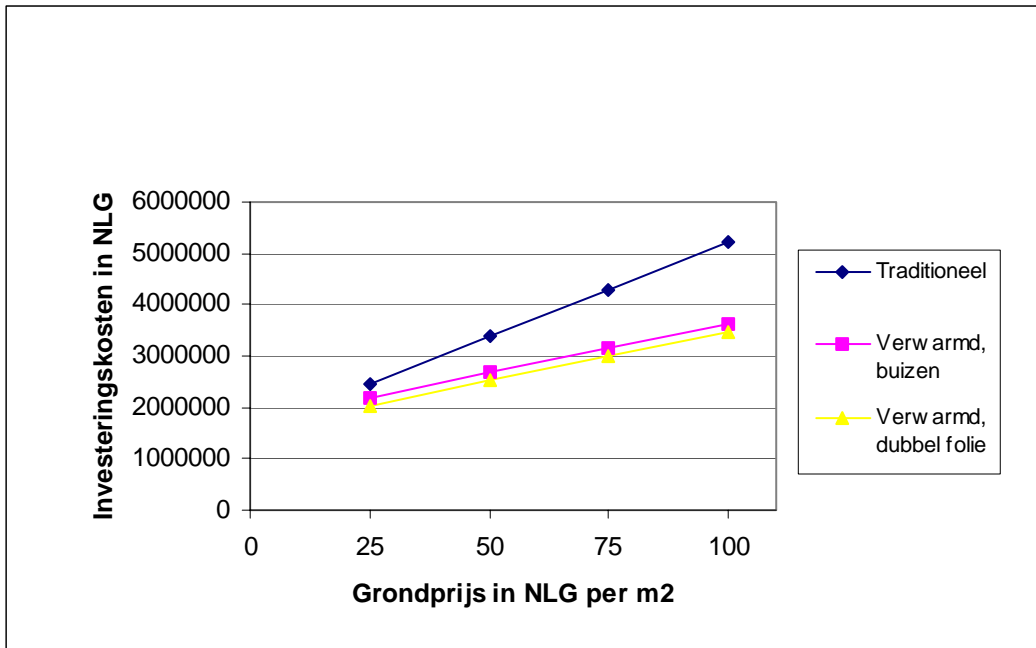


Fig. 20. Totale investeringskosten als functie van de grondprijs.

7.5 Exploitatiekosten

De exploitatiekosten worden onderverdeeld in vaste kosten en variabele kosten. Onder vaste kosten worden hier verstaan:

- afschrijving van het depot;
- kosten van het gebruik van de grond;
- loonkosten van de toezichthouder;
- onderhoudskosten van het depot.

De variabele kosten zijn afhankelijk van de hoeveelheid slib die in het depot wordt verwerkt. De variabele kosten bestaan uit:

- inhuur van materieel en mensen van een loonbedrijf;
- verwarmingskosten in geval van de versnelde rijping;
- elektriciteitskosten van pompen en dergelijke;
- afvoer van het product.

In de exploitatiekosten worden de kosten van de aanvoer van de specie niet meegenomen. De berekening van de exploitatiekosten is hier namelijk alleen bedoeld om inzicht te verkrijgen in de exploitatiekosten van de varianten ten behoeve van de onderlinge vergelijking.

7.5.1 Uitgangspunten van de exploitatieberekening

Bij de berekening van de exploitatiekosten zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- het depot wordt afgeschreven in 10 jaar, gehanteerd wordt hiervoor een vast percentage van de aanschafprijs;
- het terrein is na verwijdering van het depot weer geschikt voor andere doeleinden en behoudt daarmee zijn waarde; de kosten van het gebruik van de grond komen dus neer op de renteverliezen van de lening voor de aankoop van de grond (f 100,- per m²);
- de loonkosten van de toezichthouder (MBO-niveau) worden gesteld op f 50.000,- per jaar;

- de onderhoudskosten liggen meestal tussen 1 % (onroerende zaken) en 5 % (installaties) van de investeringen; de onderhoudskosten van het depot worden daarom gesteld op een vast percentage van de investeringen (3 %);
- de huur van een kraan en/of vrachtwagen met bestuurder bedraagt f 1.000,- per dag;
- de kosten van 1 ton stoom bedragen f 6,- (opgave EPZ), per jaar is 13.800 ton stoom nodig;
- de elektriciteitskosten bedragen circa f 0,15 per kWh;
- het product dat na rijping herbruikbaar is (b.v. van klasse 2 specie) wordt om niet afgezet; het product dat kan worden toegepast in werken (al dan niet geïsoleerd) wordt afgezet tegen een tarief van f 15,- per ton; het product van klasse 4 specie (kansarm) is niet toepasbaar en wordt afgevoerd tegen een tarief van f 125,- per ton. Een en ander is samengevat in tabel 41.

Tabel 41. Toepassingsmogelijkheden van het gerijpte product.

omschrijving	producttoepassing traditioneel	hoeveelheid in ton	producttoepassing versnelde rijping	hoeveelheid in ton
klasse 2	herbruikbaar	5.300	herbruikbaar	5.000
klasse 3, zware metalen	in werken	4.200	in werken	4.000
klasse 3, organische verbindingen	herbruikbaar	6.400	herbruikbaar	6.000
klasse 4 (kansrijk)	in werken	1.100	in werken	1.000
klasse 4 (kansarm)	niet herbruikbaar	4.200	niet herbruikbaar	4.000
totaal		21.200		20.000

7.5.2 Resultaten van de exploitatieberekening

De exploitatieberekeningen voor de drie depotuitvoeringen zijn opgenomen in bijlage E. In tabel 42 zijn de resultaten samengevat.

Tabel 42. Resultaten van de exploitatieberekeningen

aspect	traditioneel	versnelde rijping buisenverwarming	versnelde rijping dubbelfoliesysteem
exploitatiekosten per jaar	f 1.610.000,-	f 1.560.000,-	f 1.540.000,-
vaste kosten in %:			
- afschrijving	10 %	10 %	10 %
- gebruik van de grond	23 %	12 %	12 %
- toezicht en onderhoud	6 %	7 %	6 %
variabele kosten in %:			
- inhuur van mensen en materieel	23 %	23 %	24 %
- verwarming + elektriciteit	0 %	10 %	10 %
- afvoer van het product en water	38 %	37 %	38 %

Het blijkt dat de exploitatiekosten redelijk vergelijkbaar zijn. Het verschil tussen de hoogste en de laagste waarde bedraagt niet meer dan f 70.000,- ofwel minder dan 5 %. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt doordat de kosten van het grotere grondbeslag voor het traditionele systeem opwegen tegen de energiekosten van de verwarmde depots.

7.5.3 Invloed van de grondprijs

De exploitatieberekening is herhaald met een grondprijs van f 25,- per m². Voor met name het traditionele depot geeft dit een relatief grote daling te zien. De exploitatiekosten van het traditionele depot komen in dit geval onder die van de depots met versnelde rijping te liggen. Zij het dat de verschillen nog steeds vrij klein zijn; het verschil tussen de hoogste en laagste waarde bedraagt minder dan 4 %. In tabel 43 zijn de resultaten samengevat.

Tabel 43. Resultaten van de exploitatieberekeningen bij een grondprijs van f 25,- per m^2 .

aspect	traditioneel	versnelde rijping buizenverwarming	versnelde rijping dubbelfoliesysteem
exploitatiekosten per jaar	f 1.330.000,-	f 1.380.000,-	f 1.360.000,-
vaste kosten	f 342.000,-	f 321.000,-	f 301.000,-
variabele kosten	f 988.000,-	f 1.059.000,-	f 1.059.000,-

In figuur 21 is het verband weergegeven tussen de grondprijs en de jaarlijkse exploitatiekosten. Het blijkt dat bij grondprijzen tot circa f 75,- per m^2 de exploitatiekosten van het traditionele depot het laagste zijn, daarboven zijn de systemen met versnelde rijping goedkoper. Opgemerkt wordt wel dat de onderlinge verschillen beperkt zijn. De exploitatiekosten van de varianten verschillen over de gehele range van grondprijzen niet meer dan 5 %.

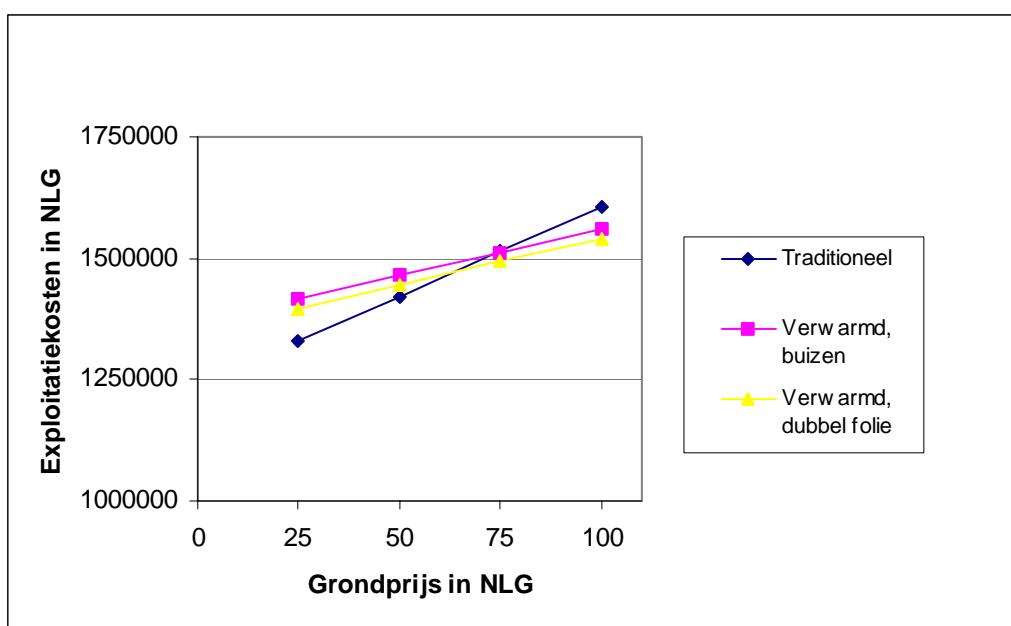


Fig. 21. Jaarlijkse exploitatiekosten als functie van de grondprijs.

7.5.4 Invloed van de warmtebehoefte

Bij de berekening van de warmtebehoefte is een situatie uitgewerkt waarbij is uitgegaan van een beperkte warmtebehoefte. In de zomerperiode is daarbij geen verwarming nodig, terwijl in de winter kan worden volstaan met 6000 ton stoom. De exploitatiekosten van de depots met versnelde rijping dalen in dit geval met een bedrag van f 47.000,- per jaar. Het verschil tussen de hoogste en laagste waarde neemt daardoor enigszins toe en bedraagt nu circa 10 %. In tabel 44 zijn de resultaten samengevat.

Tabel 44. Resultaten van de exploitatieberekeningen bij een stoombehoefte van 6000 ton per jaar

aspect	traditioneel	versnelde rijping buizenverwarming	versnelde rijping dubbelfoliesysteem
exploitatiekosten per jaar	f 1.606.000,-	f 1.477.000,-	f 1.456.000,-
vaste kosten	f 618.000,-	f 464.000,-	f 444.000,-
variabele kosten	f 988.000,-	f 1.012.000,-	f 1.012.000,-

7.5.5 Verwerkingskosten per m³ te verwerken baggerspecie

De resultaten van 7.5.2, 7.5.3 en 7.5.4 zijn gebruikt om de verwerkingskosten per m³ aangeleverde baggerspecie te berekenen. Hierbij zijn 4 situaties doorgerekend, namelijk:

1. hoge grondkosten en normaal energieverbruik;
2. lage grondkosten en normaal energieverbruik;
3. hoge grondkosten en laag energieverbruik;
4. lage grondkosten en laag energieverbruik.

Onder hoge grondkosten wordt hierbij verstaan *f* 100,- per m² en onder lage grondkosten *f* 25,- per m². Bij normaal energieverbruik is 13.800 ton stoom per jaar nodig voor de verwarming van de depots, bij laag energieverbruik kan worden volstaan met 6000 ton stoom per jaar (zie ook 7.5.4).

De resultaten van deze berekeningen zijn vermeld in tabel 45. Het blijkt dat de verwerkingskosten voor alle varianten niet ver uiteenlopen. Het verschil tussen de hoogste en laagste waarde bedraagt *f* 11,70 ofwel circa 20 %. In de meest 'gunstige' situatie (hoge grondprijs, laag energieverbruik) is rijpen met warmte *f* 5,-/m³ goedkoper. Hoewel dit op het totaalbedrag van *f* 50,-/m³ - *f* 60,-/m³ niet veel is, betekent dit voor de specifieke kosten voor rijping (dus exclusief alle afvoer-/afzetkosten) toch een aanzienlijk verschil. Deze kosten liggen namelijk tussen *f* 15,-/m³ - *f* 25,-/m³. In de meest 'ongunstige' situatie (lage grondkosten, normaal energieverbruik) is rijpen met verwarming *f* 3,50 duurder.

Rijpen in verwarmde depots zal (nog) gunstiger scoren indien de warmte om niet kan worden verkregen. Dit is denkbaar in situaties met restwarmte van een voldoende hoog temperatuurniveau en bij het optimaliseren van een kleine warmtekrachtcentrale op de warmtevraag van het depot.

Tabel 45. Verwerkingskosten per m³ baggerspecie (in *f*).

	kosten per m ³ baggerspecie in <i>f</i>											
	grondkosten hoog, energieverbruik normaal			grondkosten laag, energieverbruik normaal			grondkosten hoog, energieverbruik laag			grondkosten laag, energieverbruik laag		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
afschrijving	6,2	6,9	6,2	6,2	6,9	6,2	6,2	6,9	6,2	6,2	6,9	6,2
grondkosten	14,7	7,6	7,6	3,7	1,9	1,9	14,7	7,6	7,6	3,7	1,9	1,9
loon	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
onderhoud	1,9	2,1	1,9	1,9	2,1	1,9	1,9	2,1	1,9	1,9	2,1	1,9
subtotaal	24,7	18,6	17,8	13,7	12,8	12,0	24,7	18,6	17,8	13,7	12,8	12,0
inhuren loonwerkers	14,8	14,5	14,5	14,8	14,5	14,5	14,8	14,5	14,5	14,8	14,5	14,5
energie	0,0	6,3	6,3	0,0	6,3	6,3	0,0	2,9	2,9	0,0	2,9	2,9
afvoer producten	24,7	23,1	23,1	24,7	23,1	23,1	24,7	23,1	23,1	24,7	23,1	23,1
subtotaal	39,5	43,9	43,9	39,5	43,9	43,9	39,5	40,5	40,5	39,5	40,5	40,5
totaal	64,2	62,4	61,6	53,2	56,7	55,9	64,2	59,1	58,3	53,2	53,3	52,5

Opmerking:

- 1 traditioneel depot;
- 2 verwarming met behulp van het buizensysteem;
- 3 verwarming met behulp van het dubbelfoliesysteem.

HOOFDSTUK 8

SAMENVATTING EN DISCUSSIE

In dit hoofdstuk worden de bevindingen van het onderzoek samengevat. Waar nodig worden hierbij opmerkingen gemaakt en/of kanttekeningen geplaatst.

8.1 Laboratoriumonderzoek

Verwarming heeft een positief effect op de rijping van baggerspecie. Dit betreft zowel de fysische rijping (droging), de macrochemische omzettingen als de afbraak van organische microverontreinigingen. Onverwacht is dat temperatuurverhoging ook een effect heeft op uitloging van zink. De rijping resulteert eerst in een mobilisatie van zink die bij 10 °C gedurende de hele proefduur doorgaat en tot een overschrijding van de categorie 1 norm van het Bouwstoffenbesluit [4] leidt. Bij 20 °C stabiliseert de emissie zich op een niveau van circa 50 % van de waarde bij 10 °C, terwijl bij 30 °C een duidelijke afname waarneembaar is tot circa 33 % van de waarde bij 10 °C.

De verschillende chemische reacties verlopen bij 30 °C een factor 2 - 4 sneller dan bij 10 °C. In een laboratoriumopstelling, die vanaf de onderzijde wordt verwarmd met water van 40 °C, verloopt de fysische rijping een factor 1,6 sneller dan bij kamertemperatuur (20 °C).

Ten opzichte van praktijkcondities (gemiddelde temperatuur 10 °C, neerslag) wordt een verdubbeling van de rijpingssnelheid en daarmee de depotcapaciteit in principe haalbaar geacht.

Hoewel de laboratoriumproeven erop wijzen dat een temperatuur van 30 °C de voorkeur verdient, wijzen praktijkgegevens erop dat bij een gemiddelde jaartemperatuur van 15 °C rijping in 0,5 jaar kan plaatsvinden. Vooralsnog zijn er daarom twee scenario's beschouwd:

- a. de specietemperatuur het gehele jaar op gemiddeld 15 °C handhaven;
- b. de specietemperatuur het gehele jaar op gemiddeld 30 °C handhaven.

8.2 Warmteberekening

Het directe gebruik van koelwater van elektrische centrales zal hooguit tot een betrekkelijk geringe versnelling van het rijpingsproces leiden. Een voorwaarde hierbij is nog dat het koelwater een zo hoog mogelijke temperatuur heeft, dat wil zeggen dat het afkomstig moet zijn van centrales met een volledig koeltorenbedrijf.

Met de inzet van koelwater, dat wordt opgewarmd tot 60 °C, kan wellicht een verdubbeling van de rijpingssnelheid worden bereikt. Een goede beoordeling hiervan is mogelijk door middel van de praktijkproef. Deze zal ook inzicht moeten geven in de vochtbalans, met name welk deel van het water in vloeibare vorm wordt afgevoerd en welk deel moet worden verdampt.

Gezien de temperatuurfluctuaties over het jaar en het analoge verloop van de koelwatertemperatuur, ligt het meer voor de hand om te streven naar een constante verhoging van de depottemperatuur ten opzichte van natuurlijke waarden dan naar een temperatuur die het gehele jaar constant is: het is energetisch gezien efficiënter om te streven naar bijvoorbeeld een zomertemperatuur van 19 °C en een wintertemperatuur van 11 °C (gemiddeld 15 °C) dan naar een constante jaartemperatuur van 15 °C (dan hoeft er in de zomer niet verwarmd te worden, maar in de winter des te meer). Uiteraard is het van belang om vast te stellen onder welke temperatuurcondities (gemiddeld) voldoende versnelling van het proces wordt bereikt.

8.3 Veldproef

8.3.1 *Effecten van verwarming*

Op basis van de resultaten in met name vak 2 heeft verwarming de volgende gunstige effecten:

1. versnelling van de fysische rijping met een factor 1,6;
2. versnelling van de chemische rijping en afbraakreacties met een factor 1,7 tot 2;
3. nivellering van verschillen per laag; dit houdt in dat omzetting van de specie tijdens de rijping niet nodig is, tenzij er sprake is van een slechte structuur van de grond;
4. versnelling van de plantengroei;
5. vermindering van de hoeveelheid te zuiveren drainagewater.

Een versnelling van het totale rijpingsproces met een factor 2 is haalbaar bij een gematigde temperatuurverhoging van circa 5 °C. Op basis van extrapolatie van het verloop in vak 2 is de normwaarde voor minerale olie in 1 jaar bereikt. Omdat de afbraak in de winter stagneert, moet de specie zonder verwarming gedurende twee seizoenen worden gerijpt om deze als bouwstof te kunnen toepassen.

Echt negatieve effecten van de verwarming zijn er momenteel niet aan te geven. Uitdroging, die in het laboratorium wel is opgetreden, blijkt bij gematigde verwarming geen probleem te zijn. Waarschijnlijk is dit het gevolg van een evenwicht tussen verdamping en aanvoer van water via regenval. In vak 3 is in de bovenlaag verkitting geconstateerd, maar het is niet aannemelijk dat dit het gevolg is van verwarming. Het droge stofgehalte is met 75 % niet extreem en is ook niet hoger dan in vak 2. De primaire oorzaak van de verkitting is daarom wellicht niet de verwarming, maar de macrosamenstelling van de grond, die blijkbaar zodanig is dat verkitting gemakkelijk optreedt.

Door de verwarming zal er, behalve bij de eerste consolidatie, geen vorming van drainagewater optreden. Dit betekent dat er minder stoffen zullen uitspoelen en dat er dus ook minder noodzaak is tot het treffen van bodembeschermende voorzieningen. Echter, als er sprake is van brakke of zoute specie is uitspoeling gunstig uit het oogpunt van verlaging van zoutgehalten. Het is dan een nadeel als deze uitspoeling geremd wordt. Een optie is dan om de consolidatie in de winterperiode zonder verwarming te laten plaatsvinden. In de zomerperiode (bij de proef van april tot en met oktober) treedt er ook in het onverwarmde depot geen drainage op en speelt dit effect dus geen rol.

8.3.2 *Mechanismen van versnelling van de rijping*

Vanuit praktijkervaringen is bekend dat specie eerst fysisch moet rijpen, waarna de chemische rijping volgt. Een versnelde fysische rijping zal dus ook in een versnelde chemische rijping volgen en dat wordt ook waargenomen bij de huidige proef. In feite wordt het rijpingsseizoen verlengd.

Gezien de hoeveelheden drainagewater en oppervlakkig afstromend water, moet de versnelde fysische rijping het gevolg zijn van hogere verdamping in het verwarmde vak. Het water moet dan opwaarts worden getransporteerd, hetgeen mogelijk is via capillaire opstijging (vloeistof) of in de vorm van waterdamp via gasgevulde poriën. Voor dit laatste proces moet de specie al deels ontwaterd zijn. De verdamping kan verder worden versneld door de ontwikkeling van vegetatie, die in vak 2 maximaal is. De fysische rijping is in vak 2 na 20 weken (eind juni) voldoende en de plantengroei speelt dan een (belangrijke) rol spelen. Daarom kunnen zowel versnelde verdamping als gevolg van fysische processen en een grotere verdamping door planten een bijdrage leveren aan de snellere fysische rijping.

De snellere ontwikkeling van de plantengroei is wellicht ook een temperatureffect. Ook is waargenomen dat de planten in vak 2 dieper wortelen dan in de referentie. Dit kan de rijping in de onderste lagen bevorderen, door structuurverbetering, zuurstoftoevoer en stimulering van de

microbiologische activiteit. De diepere beworteling is waarschijnlijk het gevolg van een snellere rijping van de onderste laag, zodat er synergistische effecten zijn tussen temperatuurverhoging en plantengroei.

Verder heeft temperatuurverhoging in algemene zin een versnellend effect op alle chemische en meestal ook op biologische reacties.

8.3.3 Waarde van laboratoriumrijpingstests

Uit de gegevens, die tot nu toe zijn verkregen, blijkt een goede overeenkomst tussen de versnelde laboratoriumrijpingstest en de praktijkresultaten. In tabel 46 worden enkele belangrijke parameters van laboratorium- en praktijkgerijpte specie met elkaar vergeleken.

Tabel 46. Vergelijking tussen de versnelde laboratoriumrijping (4 weken) met de resultaten van de veldproef (38 weken).

parameter	veld		laboratorium
	referentie	5 °C verhoogd	
pH	6,5	6,7	7,5
Eh (mV)	370	360	368
S-oxidatie (%)	28	33	33
gehalte aan minerale olie (mg/kg ds)	970	670	740
afbraak van minerale olie (%)	25	55	40
uitloging			
sulfaat (mg/kg ds)	1580	1800	1900
cadmium (mg/kg ds)	0,002	0,004	0,013
zink (mg/kg ds)	0,88	0,76	0,49
koper (mg/kg ds)	0,34	0,76	0,55

Het algehele beeld is dat de laboratoriumtest de praktijkrijping bij verhoogde temperatuur goed voorspelt na circa 30 weken rijping. Bij voortzetting van de praktijkrijping blijkt minerale olie nog verder te dalen, daarom zou de laboratoriumtest ook moeten worden verlengd (voor de periode na 4 weken zijn geen betrouwbare resultaten verkregen).

Voor de onverwarmde specie geldt dat deze na 40 weken rijping nog achterblijft bij de laboratoriumkwaliteit na 4 weken.

De metaaluitloging is weliswaar niet geheel identiek, maar de laboratoriumtest geeft wel aan welke metalen potentieel kritisch zijn ten opzichte van de normstelling.

Geconcludeerd wordt dat de laboratoriumtest bruikbaar is om de kwaliteit van de gerijpte specie in redelijke mate te voorspellen.

8.3.4 Evaluatie van de praktijkmonitoring

De praktijkdepots zijn in totaal vijf keer uitgebreid onderzocht. Gezien het vrij trage verloop van de reacties was een iets lagere frequentie (4 keer) ook voldoende geweest. Dit is ook voorgescreven in het monitoringsprotocol [14].

Voor de bruikbaarheid van de verschillende rijpingsindicatoren geldt het volgende:

1. ijzer geeft een goede indicatie van de aanwezigheid van anaërobe lagen of spots; de ijzer-oxidatie verloopt echter sneller dan die van zwavel;
2. het gedrag van mangaan is niet goed te verklaren en daarom is dit geen bruikbare indicator;
3. sulfaat geeft het beste beeld van het verloop van de oxidatiereacties.

De zwaveloxidatie is in dit geval eerder voltooid dan de afbraak van minerale olie. Sulfaat is daarmee niet bruikbaar als enige rijpingsindicator, minerale olie zal ook moeten worden geanalyseerd.

8.3.5 *Opties voor verdere optimalisatie van het rijpingsproces*

Door de problemen met de structuur van de grond in vak 3 zijn de resultaten niet goed bruikbaar. Het is daarom niet uitgesloten dat een verdere versnelling van de rijpingsreacties haalbaar is bij een hogere temperatuur. Met andere woorden, het temperatuuroptimum is nog niet duidelijk.

De zwaveloxidatie blijft steken bij circa 33 %. De oorzaak hiervan is niet duidelijk. Als dit proces verder kan worden beperkt, zal sulfaat geen kritische parameter meer zijn.

Een optie voor afbraak van PCB's is de combinatie van een anaërobe voorfase en (normale) aërobe rijping.

Momenteel is niet duidelijk waarom de uitloging van koper op een relatief hoog niveau ligt. Dit zou eerst nader moeten worden onderzocht. Een optie voor verlaging van de uitloging is de verdere afbraak van DOC.

8.3.6 *Perspectief van verwarming*

Uit de tot nu toe verkregen resultaten komt naar voren dat een matige verwarming, waarbij de temperatuur op het grensvlak drainzand/specie circa 40 °C bedraagt, in een halvering van de rijpingsduur resulteert. Dit betekent dat verwarming perspectief heeft. De economische haalbaarheid moet uiteraard nog nader worden onderbouwd. Dit wordt gedaan in de volgende paragraaf.

8.4 **Beoordeling voor grootschalige toepassing**

In het kader van dit onderzoek is de haalbaarheid van de versnelde rijping van baggerspecie onder invloed van verwarming onderzocht. Een systeem uitgaande van buizenverwarming en een systeem gebaseerd op een dubbelfolie zijn hierbij vergeleken met een traditioneel ingericht depot.

Beide systemen met verwarming zijn op technische gronden haalbaar. Het buizensysteem wordt reeds toegepast bij de verwarming van broeikassen en gaat uit van bewezen technieken. Het dubbelfoliesysteem maakt een extra folielaag voor de onderafdichting van het depot waarschijnlijk overbodig. Dit is echter een relatief nieuwe technologie die zich in praktijksituaties nog niet bewezen heeft.

Door de toepassing van versnelde rijping van baggerspecie onder invloed van warmte kan de capaciteit van een baggerspeciedepot aanzienlijk worden vergroot. Ofwel, bij gelijkblijvende capaciteit van het depot, kan een aanzienlijke ruimtebesparing worden bereikt ten opzichte van de traditionele verwerkingsmethode. Als gerekend wordt met een grondprijs van f 100,- per m², is voor de modeldepots de investering in het traditionele systeem het hoogst door het grotere ruimtebeslag. Uiteraard wordt het verschil in investeringen kleiner als de grond voor een lager bedrag kan worden aangekocht.

De exploitatiekosten van de onderzochte varianten zijn redelijk vergelijkbaar. Een voorwaarde voor de economische haalbaarheid van versnelde rijping is wel de beschikbaarheid van goedkope restwarmte. Bijvoorbeeld in de vorm van lagedrukstoom of heet water.

Als de grond echter voor een bedrag lager dan $f\ 75,-$ per m^2 kan worden verworven, wegen de extra kosten van verwarming van het depot niet op tegen de besparingen door het geringere ruimtebeslag. De exploitatiekosten van het traditionele depot zijn dan enigszins lager (tot circa 4 % bij een grondprijs van $f\ 25,-$).

In de meest 'gunstige' situatie (hoge grondprijs, laag energieverbruik) is rijpen met warmte $f\ 5,-/m^3$ goedkoper. Hoewel dit op een totaalbedrag van $f\ 50,-/m^3 - f\ 60,-/m^3$ niet veel is, betekent dit voor de specifieke kosten voor rijping (dus exclusief alle afvoer-/afzetkosten) toch een aanzienlijk verschil. Deze kosten liggen namelijk tussen $f\ 15,-/m^3 - f\ 25,-/m^3$. In de meest 'ongunstige' situatie (lage grondkosten, normaal energieverbruik) is rijpen met verwarming $f\ 3,50$ duurder. Rijpen in verwarmde depots zal (nog) gunstiger scoren indien de warmte om niet kan worden verkregen. Dit is denkbaar in situaties met restwarmte van een voldoende hoog temperatuurniveau en bij het optimaliseren van een kleine warmtekrachtcentrale op de warmtevraag van het depot.

In de praktijk betekent dit dat voor een bepaalde locatie de keuze tussen een traditioneel depot en een depot met versnelde rijping, grotendeels wordt bepaald door:

1. de hoeveelheid grond die beschikbaar is voor het depot en welke prijs hiervoor moet worden betaald;
2. de beschikbaarheid van voldoende goedkope restwarmte in de nabije omgeving van de beoogde locatie.

Samenvattend wordt geconcludeerd dat versnelde rijping van baggerspecie met restwarmte onder bepaalde randvoorwaarden technisch en economisch haalbaar is. De kosten zijn dan vergelijkbaar met traditionele rijping. Het voordeel is dat met een geringer ruimtebeslag kan worden volstaan.

HOOFDSTUK 9

CONCLUSIES

Samenvattend worden de volgende conclusies uit het onderzoek getrokken:

1. De rijping van baggerspecie kan onder invloed van een verhoogde temperatuur met een factor 2 worden versneld. Er zijn geen verschillen in temperatuuroptima van de diverse rijpingsprocessen geconstateerd, hoewel een sterke opwarming wellicht eerder tot uitdroging leidt. Voor de onderzochte specie is de afbraak van minerale olie het limiterende proces voor de verblijftijd. Afhankelijk van het concentratieniveau van minerale olie en het specietype, kan de versnellingsfactor per specietype enigszins variëren.
2. Processturing is mogelijk via beperkte monitoring van met name de zwaveloxidatie en de afbraak van minerale olie. Specifieke maatregelen om uitdroging te voorkomen, zoals omzetting of beregening, waren bij de matige opwarming van de onderzochte specie niet nodig.
3. De versnelling van de rijping met een factor 2 is bereikt bij een temperatuur in de specielaag die gemiddeld 5 °C hoger is dan in de onverwarmde referentie. Door problemen in het vak dat 10 °C in temperatuur was verhoogd, is niet zeker of een toename met 5 °C optimaal is. Het ligt voor de hand dat met name in de winterperiode een grotere opwarming (10 °C) meer effect sorteert. Er moet echter een optimum worden gezocht tussen energieverbruik en versnelling van de rijping. De opwarming met 5 °C kan worden bereikt met water dat een temperatuur heeft van circa 50 °C.
4. De specie kan worden verwarmd via een gesloten systeem, waarin water circuleert via buizen of een dubbele laag folie, gevuld met zand. Het water wordt opgewarmd via een warmtewisselaar met behulp van lagedrukstoom, die wordt betrokken van een nabij gelegen elektrische centrale. Overigens zijn ook andere uitvoeringsvarianten en warmtebronnen denkbaar, zoals directe inzet van koelwater en de bouw van een kleine warmtekrachtcentrale, die wordt geoptimaliseerd op de warmtevraag van het depot.
5. De kosten van rijping in een verwarmd depot zijn vergelijkbaar met rijping in een traditioneel depot. In situaties met een grondprijs van $f 100,-/m^2$ en lage kosten voor (rest)warmte, is rijping in een verwarmd depot $f 5,-/m^3$ goedkoper dan rijping in een onverwarmd depot. In situaties met een lage grondprijs en een hoog energieverbruik in rijping in een verwarmd depot $f 3,50 /m^3$ duurder.
6. Uit het voorgaande volgt dat rijping van baggerspecie in een verwarmd depot technisch en economisch een haalbare optie is.

LITERATUUR

1. Gemeentewerken Rotterdam, 1995.
Inventarisatie oude rijpingskennis.
Rapportnummer W-DWW-95-346 in de PHB-reeks, DWW, Delft.
2. Tauw Milieu, 1996.
Ontwikkeling van een laboratoriummethode voor het simuleren van situering van verontreinigde baggerspecie. Fase 1: beoordeling haalbaarheid.
Rapportnr. 3483908.W01, Tauw Milieu, Deventer. Opdrachtgever: DWW, Delft.
3. Tauw Milieu, 1997.
Ontwikkeling van een laboratoriummethode voor het simuleren van situering van verontreinigde baggerspecie. Fase 2: testontwikkeling.
Rapportnr. 3536548.W02, Tauw Milieu, Deventer. Opdrachtgever: DWW, Delft.
4. Bouwstoffenbesluit bodem- en oppervlaktewaterenbescherming, 1995.
Staatsblad 567.
5. Grontmij Zuid-Holland/Iwaco, 1998.
Baggerspecie in doorgangsdepots. Monitoring van rijpingsnelheid, uitloging en afbraak van organische verontreinigingen in drie typen baggerspecie.
Hoofdrapport, Meetrapport. Opdrachtgever: Gem. Orgaan Baggerspecie Zuid-Holland.
6. Iwaco, 1996.
Chemische aspecten bij het rijpen en nuttig toepassen van verontreinigde baggerspecie.
Rapportnummer W-DWW-96-043 in de PHB-reeks, DWW, Delft.
7. Tauw Milieu/TNO-MEP/TUD/Budelco, 1997.
Haalbaarheidsonderzoek in-situ bioleaching van met zware metalen verontreinigde grond.
Fase I.1: Literatuuronderzoek.
Rapport 3540170, Tauw Milieu, Deventer. Opdrachtgever: NOBIS, Gouda.
8. Tauw Milieu, 1997.
Haalbaarheidsonderzoek in-situ bioleaching van met zware metalen verontreinigde grond.
Fase I.2: Karakterisering uitgangsmateriaal.
Rapport 3540170W02, Tauw Milieu, Deventer. Opdrachtgever: NOBIS, Gouda.
9. Hak Milieutechniek/Geokinetics, 1998.
Evaluatierapport in-situ sanering bedrijfsterrein gelegen aan de Ampèrestraat 10 te Hilversum (NOS).
Rapportnr. mvv97UV1012-03, Hak Milieutechniek/Geokinetics, Elst.
10. Hak Milieutechniek/Geokinetics, 1997.
Saneringsplan elektro reclamatie Buitenhaven - Achter het Arsenaal, Nieuwpoort.
Rapportnr. 97UV1010, Hak Milieutechniek/Geokinetics, Elst.
11. Tauw, 1992.
Onderzoek naar de reiniging van PAK houdende grond en baggerspecie met behulp van white rot funghi.
12. Tauw, 1999.

Haalbaarheidsonderzoek depotreiniging van baggerspecie: stimulering van biologische processen met restwarmte.
Rapportnr. R3543374.D03, Tauw, Deventer.

13. Grontmij/van Ruiten Adviesbureau, 1996.
Klei uit baggerspecie deel 4. Marktverkenning gerijpte klei: basis toekomstige marktstrategie.
Rapport W-DWW-96-123, DWW, Delft.
14. Tauw, 1998.
Monitoringsprotocol voor de rijping van baggerspecie in depots.
Rapportnr. 3668185.D03, Tauw, Deventer. Opdrachtgever: DWW, Delft.
15. Feddes, R.A. en J.T. Huinink, 1990.
Warmtehuishouding.
In: Bodemkunde van Nederland, Deel I. Redactie: W.P. Locher en H. de Bakker, Malmberg, Den Bosch.
16. Van Zwol, A., 1998.
Pilotproef versnelde veroudering. Warmtehuishouding/CO₂- en O₂-verbruik.
Afstudeerverslag TU Twente/Tauw.
17. Tauw, 1999.
Haalbaarheidsonderzoek depotreiniging van baggerspecie: stimulering van biologische processen met restwarmte. Fase 3, veldproef.
Rapportnr. R002/3543374/JJS/C01/D, Tauw, Deventer.
18. Bakker, P./Tauw Milieu, 1998.
Depotreiniging baggerspecie met behulp van restwarmte. Deelverslag 1.
Rapportnr. 3543374.D01, Tauw Milieu, Deventer. Stageverslag P. Bakker.
19. DACE prijzenboekje, ramingen op basis van eerdere ervaringen bij het ontwerp van baggerdepots

Overige literatuur

20. Tauw Milieu, 1995.
Kennisinventarisatie depotscheiding.
Rapportnummer W-DWW-95-348 in de PHB-reeks, DWW, Delft.
21. Uitvoeringsbesluit verontreiniging rijkswateren, 1970.
Staatsblad 536.

BIJLAGE A

WERKWIJZE EN RESULTATEN VAN BEPALINGEN VAN WARMTECAPACITEIT EN WARMTEGELEIDINGSCOËFFICIËNT

A1 Werkwijze voor bepalingen van warmtecapaciteit en warmtegeleidingscoëfficiënt

Deze bijlage is een verkorte weergave van delen uit het stageverslag van P. Bakker [18]. Op grond van aanvullende modelberekeningen zijn een enkele wijzigingen aangebracht.

Warmtecapaciteit

De warmtecapaciteit van baggerspecie is met behulp van de volgende proef bepaald. Een bekende hoeveelheid baggerspecie is in een geïsoleerd vat gebracht. Nadat de temperatuur van het vat en de specie in evenwicht zijn, is een bekende hoeveelheid warm water met een bekende temperatuur aan de specie in het vat toegevoegd. Het water geeft warmte af aan de specie en het vat totdat de temperatuur van het water, het vat en de specie gelijk zijn. Het verloop van de temperatuur wordt gevolgd met behulp van een temperatuurlogger. De temperatuur bij de nieuwe evenwichtssituatie wordt gemeten.

Nu de begintemperaturen, de eindtemperaturen en de hoeveelheden ingebracht materiaal bekend zijn, kan de C_p -waarde voor de specie worden berekend met de volgende formule:

$$C_{p,\text{water}} \cdot \Delta T_{\text{water}} \cdot M_{\text{water}} = \Delta T_{\text{specie+vat}} \cdot (C_{p,\text{specie}} \cdot M_{\text{specie}} + C_{p,\text{vat}} \cdot M_{\text{vat}}) \quad (\text{A1})$$

waarin:

- C_p is de warmtecapaciteit (J/(kg,K));
- ΔT is het temperatuurverschil: eind-begin (K);
- M is de massa (kg).

Door deze proef ook met materiaal te doen waarvan de warmtecapaciteit bekend is (b.v. aluminium of water) kan het product $C_{p,\text{vat}} \cdot M_{\text{vat}}$ worden bepaald.

De warmtecapaciteit is bepaald bij verschillende droge stofgehalten. Op deze manier kan inzicht worden verkregen in de relatie tussen de warmtecapaciteit van baggerspecie en de warmtecapaciteit. De resultaten zullen worden vergeleken met berekeningen conform A2.

Warmtegeleiding

De warmtegeleidingscoëfficiënt is een belangrijke parameter om iets te kunnen zeggen over het verloop en de snelheid van de opwarming van een bepaalde hoeveelheid baggerspecie. Door middel van de volgende proef kan de warmtegeleiding van baggerspecie worden bepaald. De warmtegeleiding van het materiaal wordt bepaald door een cilindervormig vat volledig te vullen met baggerslib. In het midden van het vat wordt een thermokoppel aangebracht. Het vat wordt vervolgens ondergedompeld in een bak met warm water (ca. 50 °C). Er zal nu warmte-indringing gaan plaatsvinden. De thermologger registreert het verloop van de temperatuur van de specie in de tijd. Met behulp van het computermodel (zie bijlage C) kan vervolgens de warmtegeleidingscoëfficiënt ($\lambda = \text{W/m,K}$) van de specie worden bepaald. Hierbij wordt de warmteweerstand van het vat (blik) verwaarloosd. De warmtegeleiding zal bij verschillende droge stofgehalten worden bepaald.

A2 Berekening van de warmtecapaciteit

De warmtecapaciteit van grond is opgebouwd uit de warmtecapaciteiten van organische stof, minerale delen en bodemvocht. De warmtecapaciteit van bodemlucht is zo gering dat deze veelal wordt verwaarloosd. Wat betreft warmtegeleiding is lucht echter wel van belang, vanwege de isolerende werking van lucht. De warmtecapaciteiten, die zijn gevonden in de literatuur [15], zijn:

- organische stof: 2,7 MJ/(m³,K);
- minerale delen: 1,9 MJ/(m³,K);
- bodemvocht: 4,2 MJ/(m³,K).

De warmtecapaciteit van grond of baggerspecie kan dan als volgt worden benaderd:

$$C_t = (2,7 \theta_h + 1,9 \theta_m + 4,2 \theta) \quad (A2)$$

waarin:

- C_t is de warmtecapaciteit van grond/baggerspecie (MJ/(m³,K));
- θ_h is de volumefractie van organische stof;
- θ_m is de volumefractie van minerale delen;
- θ is de volumefractie van vocht.

In figuur A1 is de invloed van het organische en droge stofgehalte (c.q. vochtgehalte) op de warmtecapaciteit grafisch weergegeven. Hierbij is de fractie organische stof geen volumefractie van het totaal (zoals in de formule), maar een fractie van het droge stofgehalte.

Fig. A1. Warmtecapaciteit van baggerspecie in afhankelijkheid van vocht- en organische stofgehalte.

A3 Resultaten van de bepaling van de warmtecapaciteit van baggerspecie

Bepaling van de warmtecapaciteit van het vat

Zoals is beschreven in A1 moet, alvorens de warmtecapaciteit van baggerspecie kan worden bepaald, de warmtecapaciteit van het vat, waarin de proef wordt uitgevoerd, worden bepaald. Dit is gedaan met behulp van water, waarvan de warmtecapaciteit bekend is, namelijk 4180 J/(kg,K). In de onderzochte situatie is 271 g water met een temperatuur van 16,3 °C aangevuld met 781 g water met een temperatuur van 58 °C. De massa van het vat is 655 gram. Na een periode van 190 minuten heeft de temperatuur zich gestabiliseerd op 43 °C. Hieruit volgt dat de C_p -waarde van het vat 1070 J/(kg,K) bedraagt.

Gevoeligheid van de berekening

In de berekening komen een aantal onnauwkeurigheden voor. Het gaat hier met name om de massa's van het (toegevoegde) water en de exacte temperaturen. Wanneer de massa toegevoegd 0,5 % afwijkt (in dit geval 4 gram meer of minder), leidt dit tot een $C_{p,vat}$ van 1084 J/(kg,K), respectievelijk 1056 J/(kg,K). De behaalde eindtemperatuur wordt op basis van een grafiek bepaald en kan mogelijk een halve graad afwijken. Wanneer voor de eindtemperatuur geen 43 maar 42,5 °C wordt aangenomen, wordt de C_p -waarde van het vat 1111 J/(kg,K). Bij een eindtemperatuur van 43,5 °C wordt de C_p -waarde van het vat 928 J/(kg,K). Wat het effect van deze verschillen in de waarden voor $C_{p,vat}$ is op de warmtecapaciteit van baggerspecie zal worden onderzocht door deze berekeningen uit te voeren met de twee uiterst gevonden waarden, namelijk $C_{p,vat} = 928$ J/(kg,K) en $C_{p,vat} = 1084$ J/(kg,K) (zie tabel A1).

Bepaling van de warmtecapaciteit van baggerspecie

De warmtecapaciteit van baggerspecie is bepaald voor twee verschillende droge stofgehalten. De berekening is uitgevoerd met de door middel van de proef gevonden waarde voor $C_{p,vat}$ van 1070 J/(kg,K). Op basis van de geconstateerde gevoeligheid voor kleine afwijkingen is de berekening ook gemaakt met een waarde voor $C_{p,vat}$ van 928 J/(kg,K) (eindtemperatuur is 43,5 in plaats van 43 °C) en een waarde voor $C_{p,vat}$ van 1084 J/(kg,K) (afwijking van de hoeveelheid water is +0,5 %). Tot slot is de warmtecapaciteit van baggerspecie ook berekend met behulp van formule (A2) (zie A2). Het organische stofgehalte bedroeg hierbij 8 % van het droge stofgehalte. In tabel A1 zijn de resultaten van de verschillende berekeningen weergegeven.

Tabel A1. Warmtecapaciteit van baggerspecie; C_p -waarden in J/(kg,K).

droge stofgehalte van specie	C_p specie volgens formule (A2)	C_p specie volgens uitkomst proef $C_{p,vat} = 1070$	C_p specie eindtemp. = +0,5 °C $C_{p,vat} = 928$	C_p specie met toeg. water = +0,5 % $C_{p,vat} = 1084$
55,3 %	3044	3158	3397	3134
68,2 %	2676	2803	3261	2759

Conclusies en aanbevelingen

Bij de specie met een droge stofgehalte van 55,3 % ligt de C_p -waarde op basis van de proef 3,7 % hoger dan de C_p -waarde zoals deze wordt berekend met formule (A2). Bij de specie met een droge stofgehalte van 68,2 % bedraagt dit verschil 4,7 %. De proef blijkt vrij gevoelig te zijn voor de nauwkeurigheid waarmee de eindtemperatuur wordt bepaald. Bij een overschatting met een halve graad ligt de C_p -waarde 6,7 % hoger voor de specie met een droge stofgehalte van 55,3 % en 16,3 % voor de specie met een droge stofgehalte van 68,2 %. Bij een onnauwkeurigheid van +0,5 % in de massa van het toegevoegde water bedragen de verschillen respectievelijk -0,8 % en -1,6 %. Gesteld kan worden dat naarmate het droge stofgehalte van de specie hoger is, de relatieve fout in de C_p -waarde groter wordt.

In de praktijk is de warmtecapaciteit van baggerspecie het snelst en eenvoudigst te berekenen met behulp van formule (A2). Waarschijnlijk is de onnauwkeurigheid vergelijkbaar met die van de proef. De onnauwkeurigheid van de formule zit met name in de gegeven warmtecapaciteiten voor minerale delen en organische stof, die naar verwachting met circa 10 % kunnen variëren, afhankelijk van de speciesamenstelling.

A4 Resultaten van de bepaling van de warmtegeleiding van baggerspecie

De warmtegeleidingsproef is uitgevoerd met 2 species met een verschillend droge stofgehalte. De eigenschappen van beide species en de belangrijkste proefomstandigheden zijn weergegeven in tabel A2.

Tabel A2. Eigenschappen en proefomstandigheden.

	droge stof (%)	organische stof (% van ds)	C_p (J/kg,K)	ρ (kg/m ³)	specietemperatuur (°C)	omgevingstemperatuur (°C)
specie 1	56	8	2944	1762	19	53
specie 2	61,5	10	2798	1670	19	47

Specie 1 - proef

Specie 1 (temperatuur = 19 °C) is gedurende circa 4 uur ondergedompeld in een warmwaterbad met een constante temperatuur van 53 °C. De thermologger heeft het temperatuurverloop van de specie in het midden van het vat geregistreerd. Het resultaat is weergegeven in figuur A2. Uit de grafiek is af te lezen dat in de eerste 20 minuten de temperatuur redelijk constant blijft. Vervolgens loopt de temperatuur vrijwel lineair op. Na 125 minuten is de temperatuur gestegen van 19 °C naar 38 °C en na 250 minuten is een temperatuur van 50 °C bereikt.

Fig. A2. Temperatuurverloop tijdens de proef met specie 1 (fit meetwaarden met polynoom) en het verloop van de modelcurven bij verschillende lambda's.

Specie 1 - simulatie

In het simulatiemodel zijn alle gegevens ingevuld. Vervolgens zijn diverse waarden voor λ ingevoerd om eenzelfde curve als van de proef te verkrijgen. Bij een λ van 1,5 benadert de modelcurve de meetwaarden goed. Een dergelijke waarde komt overeen met literatuurwaarden voor klei-grond met een hoog vochtgehalte [15]. Ter vergelijking: λ van (droog) zand = 1,0 J/(s,m,K), λ van water = 0,6 J/(s,m,K) en λ van lucht = 0,024 J/(s,m,K).

Specie 2

Specie 2 is gedurende 5 uur ondergedompeld in een warmwaterbad met een constante temperatuur van 47 °C. Het temperatuurverloop tijdens de proef is weergegeven in figuur A3, evenals de modelberekeningen.

Fig. A3. Temperatuurverloop tijdens de proef met specie 2 (fit meetwaarden met polynoom) en het verloop van modelcurven bij verschillende lambda's.

Conclusies

De λ van specie 1 met een droge stofgehalte van 56 % is met behulp van het simulatiemodel vastgesteld op 1,5 J/(s,m,K). Specie 2 bevat meer droge stof, namelijk 68,2 % en heeft een wat lagere dichtheid. Volgens [15] zal dit in de range van de betreffende parameters resulteren in een lagere warmtegeleidingscoëfficiënt. Dit wordt bevestigd door de modelberekeningen, waaruit een λ voor specie 2 volgt van 1,3 J/(s,m,K).

BIJLAGE B

ONTSTAAN EN BESCHIKBAARHEID VAN RESTWARMTE BIJ ELEKTRICITEITSCENTRALES

B1 Restwarmte bij elektriciteitscentrales

In deze bijlage wordt ingegaan op het vrijkomen van restwarmte bij elektriciteitsopwekking en de mogelijkheden om deze te benutten voor de versnelde rijping van baggerspecie. Er is in eerste instantie gekozen voor de restwarmte van elektriciteitscentrales, omdat deze over het algemeen een gunstige ligging hebben (aan het water) en er in de directe omgeving ruimte voor depots aanwezig is. Bij andere industrieën komt ook warmte vrij, maar meestal is hier onvoldoende ruimte beschikbaar. In de tabellen B1 en B2 is een overzicht gegeven van elektriciteitscentrales in Nederland. Hierbij is aangegeven welke centrales wel (rest)warmte leveren aan derden en bij welke centrales dit niet het geval is. Ook staat per centrale het vermogen vermeld. Uit dit overzicht blijkt dat de grootste centrales niets doen met hun restwarmte. Dit kan komen doordat hiervoor geen voorzieningen aanwezig zijn of doordat er in de omgeving geen vraag is naar warmte. Overigens geldt ook voor de centrales die al warmte benutten dat er nog wel mogelijkheden kunnen zijn voor warmtelevering. Dit hangt af van de mate waarin de beschikbare warmte nu al wordt benut, de eisen die worden gesteld aan de temperatuur en de prijs die men wil betalen voor de warmtelevering.

De mogelijkheden om stoom, dan wel koelwater voor verwarming van baggerspeciedepots te benutten zijn besproken met dhr. Arends van EPZ (Elektriciteits Productiemaatschappij Zuid-Nederland).

Tabel B1. Overzicht van centrales die (rest)warmte leveren.

centrale	vermogen (MW)	energiedrager
Amer, Geertruidenberg	1.659	kool/olie (645 MW) kool/gas (600 MW) gas/olie (414 MW)
Gelderland, Nijmegen	602	kool/olie
Lage Weide, Utrecht	512	gas/olie (265 KW) gas (247 MW)
Merwedekanaal, Utrecht	423	gas
RoCa, Rotterdam	269	gas
Moerdijk	268	gas
Diemen	249	gas
Galileïstraat, Rotterdam	209	gas
Donge, Geertuidenberg	121	gas
Almere	118	gas
Leiden	81	gas
Den Haag	78	gas
Purmerend	69	gas
totaal vermogen	4.658	

Tabel B2. Overzicht van centrales zonder benutting van restwarmte.

centrale	vermogen (MW)	energiedrager
Eemscentrale, Eemshaven	2.400	gas
Clauscentrale, Maasbracht	1.280	gas/olie
Hemweg, Amsterdam	1.229	kool/gas (630 MW) gas/olie (599 MW)
Maasvlakte	1.040	kool/gas
Borssele	870	uranium kool/gas gas/olie
Velsen	846	gas/olie
Harculo	681	gas/olie
Bergum	664	gas
Waalhaven, Rotterdam	664	gas/olie (651 MW) olie (13 MW)
Flevo, Lelystad	513	gas/olie
Maascentrale, Buggenum	223	kool/gas
Dordrecht	167	gas/olie
Hengelo	102	gas/olie
Delft	93	gas/olie
totaal vermogen	10.772	

Restwarmte bij elektriciteitsproductie

Het opwekken van stroom in elektriciteitscentrales vindt plaats door thermische energie met behulp van turbines om te zetten in mechanische energie. Vervolgens wordt door middel van generatoren de mechanische energie omgezet in elektrische energie. Bij dit proces blijft noodzakelijkerwijs een flink deel van de thermische energie over, omdat deze bij lage temperaturen moeilijk kan worden omgezet in arbeid. Met name bij stoomturbines gaat de condensatiewarmte van stoom verloren als de gebruikte stoom in de koelinstallatie wordt gecondenseerd. De warmte wordt hierbij afgegeven aan het zogenaamde koelwater, wat vervolgens op het oppervlaktewater wordt geloosd.

Stoom

In elektriciteitscentrales zijn diverse aftapmogelijkheden voor stoom aanwezig. Deze af te tappen stoom kent verschillende niveaus: van 1 tot 50 bar. De bijbehorende temperaturen zijn respectievelijk circa 100 °C en 270 °C. Met behulp van een warmtewisselaar kan deze warmte worden benut voor bijvoorbeeld stadsverwarming, maar ook wordt deze warmte door de centrale zelf gebruikt om water voor te verwarmen alvorens dit de ketel ingaat. Zo wordt er bespaard op brandstofverbruik. Er is hier dus eigenlijk geen sprake van restwarmte. Aan het onttrekken van stoom voor verwarming van het depot zijn dan ook kosten verbonden. Voor laagwaardige stoom wordt een prijs berekend van circa f 5,- à f 6,- per ton stoom (1 ton stoom levert ca. 2 GJ warmte).

Koelwater

In de condensor wordt stoom afgekoeld met behulp van koelwater. Dit koelwater is veelal oppervlaktewater (uit rivieren, kanalen enz.). Na opwarming wordt dit water weer geloosd op het oppervlaktewater. Hieraan zijn een aantal eisen verbonden in het kader van de WVO. Het water mag onder andere niet meer dan 7 °C warmer zijn dan het water waarop het geloosd wordt. In warme zomers kan dit nog minder zijn, om de biologie van het water te beschermen. De temperaturen van het ingaande koelwater variëren tussen de 4 °C ('s winters) en de 25 °C

(’s zomers). Na het verlaten van de condensor zal de temperatuur circa 7 °C warmer zijn. Indien het water te warm is om direct te kunnen worden geloosd, wordt gebruik gemaakt van de koeltoren. De temperaturen van het ingaande water zullen tussen de 20 en 40 °C liggen.

Opwarming van het depot

Het benutten van koelwater is een optie. Een nadeel is echter de minder constante en lage temperatuur. Koelwater van bijvoorbeeld 30 °C (water dat de koeltoren ingaat) zou toepasbaar kunnen zijn, wanneer uit de laboratoriumproeven blijkt dat bij deze temperatuur voldoende versnelling van het rijpingsproces plaatsvindt. Van belang is dan wel dat er inzicht bestaat in de temperatuurschommelingen van het koelwater, de invloed hiervan op het rijpingsproces en de mate van beschikbaarheid van dit water.

Wanneer een temperatuur van 30 °C onvoldoende blijkt te zijn, zal er moeten worden gekeken naar andere mogelijkheden. Eerst zal dan worden doorgerekend of opwarming van het koelwater met lagedrukstoom economisch haalbaar is. Verder kan worden gedacht aan restwarmte van AVI's of andere industrieën.

BIJLAGE C

BESCHRIJVING VAN HET COMPUTERMODEL VOOR WARMTEBEREKENINGEN EN INPUTGEGEVENS

C1 Opzet van het computermodel

Om de warmtegeleiding in een sliblaag te simuleren is een computermodel ontwikkeld. Dit model gaat uit van een cilindervormig systeem, welke is opgedeeld in ringvormige elementjes (zie fig. C1). Er wordt aangenomen dat de temperatuur in één elementje uniform is en constant tijdens een bepaalde tijdstep. Tussen de elementjes zullen warmtestromen gaan plaatsvinden als gevolg van temperatuurverschillen tussen de afzonderlijke elementjes. Deze warmtegeleiding zal zowel in axiale als in radiale richting optreden. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat de warmtestroom door geleiding evenredig is met het temperatuurverschil tussen twee elementjes, het warmte-uitwisselend oppervlak en de geleidingscoëfficiënt, en omgekeerd evenredig met de afstand waarover het warmtetransport plaatsvindt.

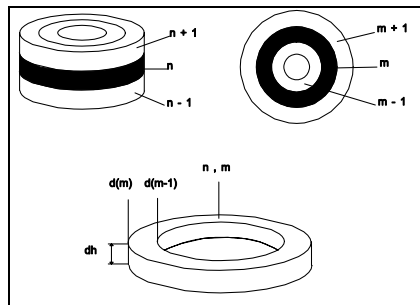


Fig. C1. Ringvormige elementjes in het model.

$d_{(m)}$ is de buitendiameter van het elementje (n,m) ;

d_h is de hoogte van een elementje.

Het aantal ringen (m) en het aantal laagjes (n) kan worden bepaald in het model. De laagjes zijn van belang voor het axiale warmtetransport (in verticale richting) en de ringen voor het radiale warmtetransport (in horizontale richting).

De warmtebalans over één elementje kan als volgt worden beschreven:

accumulatie = ingaand - uitgaand

$$\text{accumulatie} = \frac{(\rho \cdot V \cdot C_p \cdot \Delta T)}{\Delta t} = \frac{(\rho \cdot C_p \cdot \Delta T)}{\Delta t} \cdot \frac{1}{4} \pi d_h (d_m^2 - d_{m-1}^2)$$

$$\text{ingaand} = \frac{\lambda}{d_h} (T_{n-1,m} - T_{n,m}) \frac{1}{4} \pi (d_m^2 - d_{m-1}^2) + \frac{2\lambda}{d_m - d_{m-1}} (T_{n,m-1} - T_{n,m}) \pi d_{m-1} d_h$$

$$\text{uitgaand} = \frac{\lambda}{d_h} (T_{n,m} - T_{n+1,m}) \frac{1}{4} \pi (d_m^2 - d_{m-1}^2) + \frac{2\lambda}{d_m - d_{m-1}} (T_{n,m} - T_{n,m+1}) \pi d_m d_h$$

waarin:

- ρ is de dichtheid van het slib (kg/m^3);
- V is het volume van het elementje (m^3);
- C_p is de warmtecapaciteit van het slib ($\text{J}/(\text{kg},\text{K})$);
- ΔT is de temperatuurverhoging van het elementje (K);
- Δt is de tijdstap waarin het warmtetransport plaatsvindt (s);
- λ is de warmtegeleidingscoëfficiënt van het slib ($\text{J}/(\text{s},\text{m},\text{K})$).

Het warmtetransport door de wanden van het systeem wordt in het model beschreven met de formules voor stationair warmtetransport door een wand:

$$\phi_{w,\text{zijkant}} = \frac{2\pi\lambda_{\text{laag}}d_h}{\ln(R_2/R_1)} \cdot (T_r - T_b)$$

$$\phi_{w,\text{boven en onder}} = \frac{\lambda_{\text{laag}}}{d_{\text{laag}}} (T_r - T_b) \frac{1}{4} \pi (d_m^2 - d_{m-1}^2)$$

waarin:

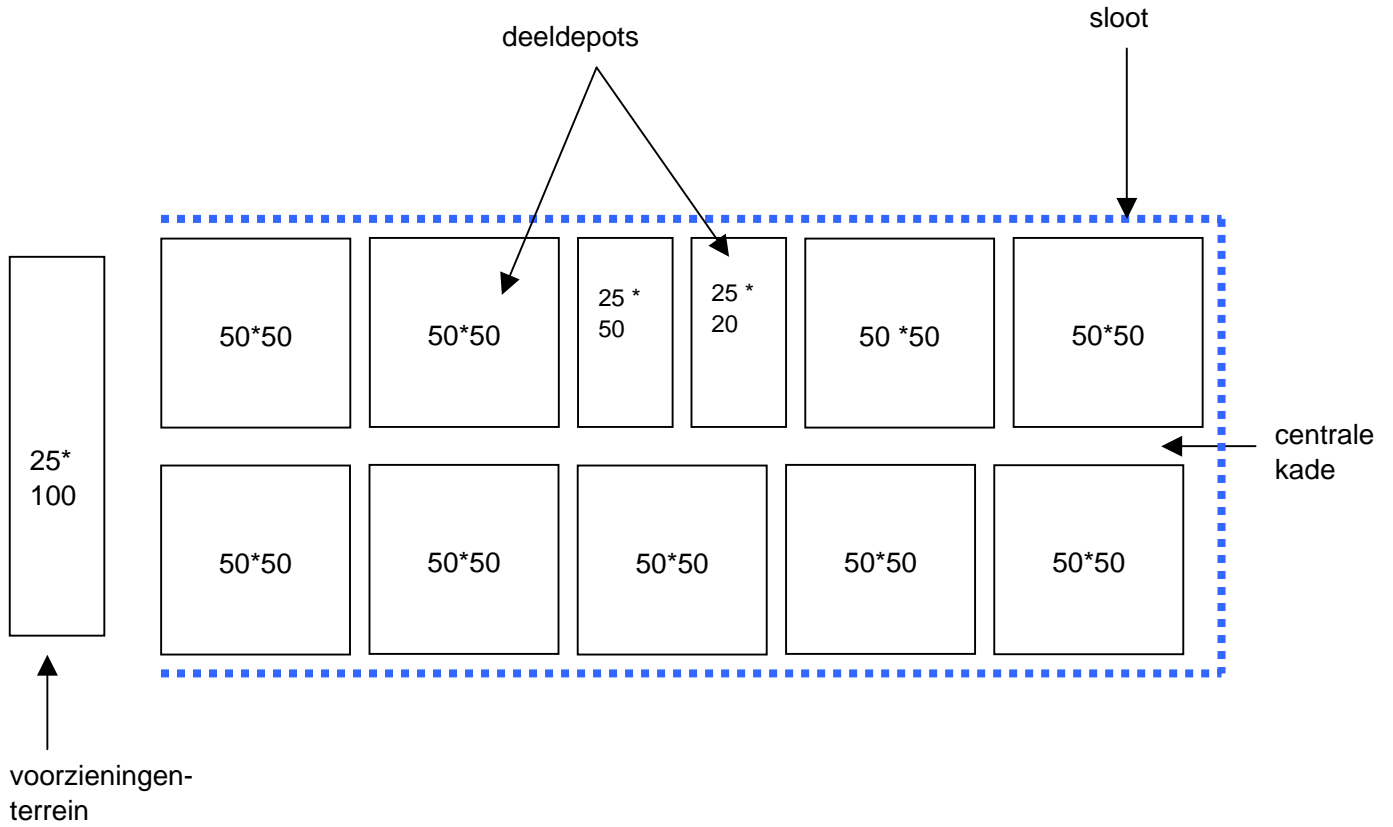
- ϕ_w is de warmtestroom door de wand (J/s);
- λ_{laag} is de warmtegeleidingscoëfficiënt van de (scheidende) laag ($\text{J}/(\text{s},\text{m},\text{K})$);
- d_{laag} is de dikte van de wand (m);
- R_1 is de buitenstraal van het slibmateriaal (m);
- R_2 is de buitenstraal van de scheidende laag (m);
- T_r is de temperatuur aan de rand van de sliblaag (K);
- T_b is de buitentemperatuur (K).

Het warmtetransport door de wanden wordt bepaald door het verschil in temperatuur binnen en buiten het systeem en door de eigenschappen van de scheidende laag. De effecten van isolatie op het opwarmproces zijn dus ook te simuleren. Tevens is het mogelijk om aan de onderzijde en bovenzijde een verschillende temperatuur op te leggen.

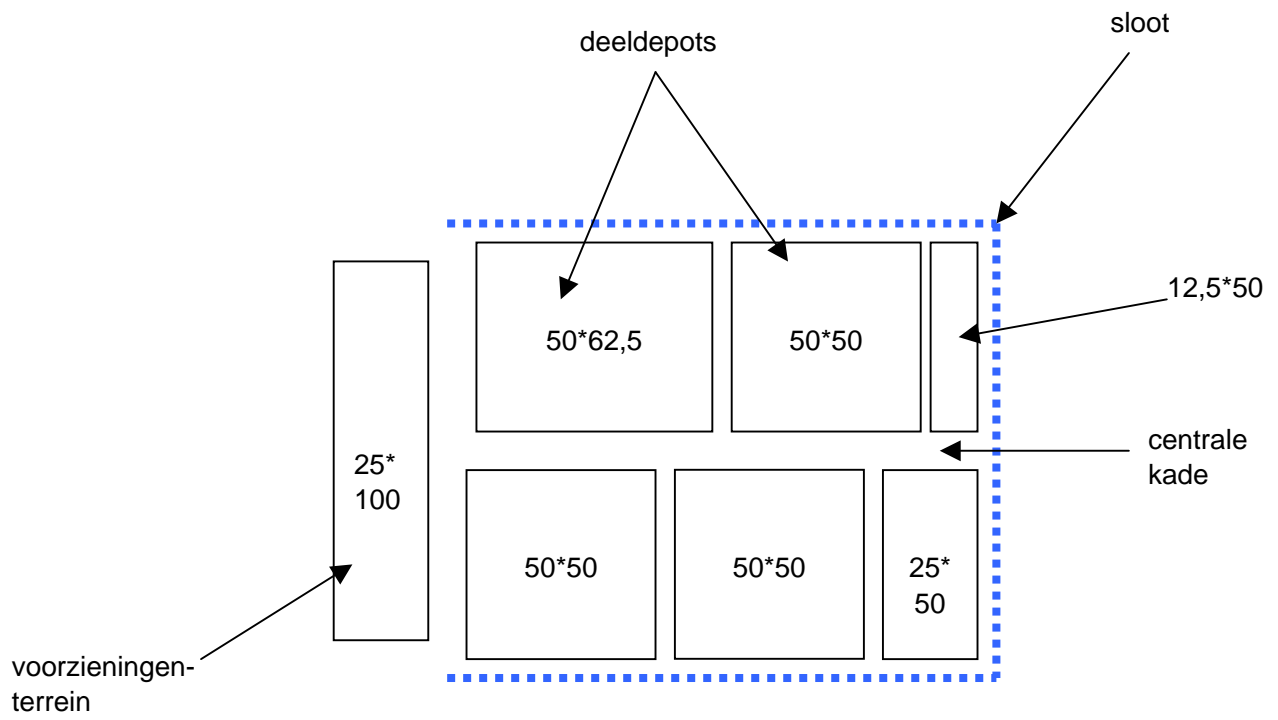
BIJLAGE D

SCHETSONTWERPEN VAN DE MODELDEPOTS

D1 Schetsontwerp van het traditionele depot (schaal 1 : 2000)



D2 Schetsontwerp van het depot voor versnelde rijping (schaal 1 : 2000)



BIJLAGE E

INVESTERINGSBEREKENINGEN EN EXPLOITATIEBEREKENINGEN

E1 Investeringsberekeningen

Tabel E1. Investeringsberekening.

hoofdkostenposten [19]	prijs (f)	eenheid	traditioneel		versnelde rijping 1		versnelde rijping 2	
			eenheden	totaalprijs	eenheden	totaalprijs	eenheden	totaalprijs
grond ontgraven, opslag en verwerking in grondlichaam	12,5	m ³	13.300	166.250	3.500	43.750	3.500	43.750
leveren van zand en verwerking in drainagelaag	22,5	m ³	12.500	281.250	3.500	78.750	3.500	78.750
aanbrengen van folie	12,5	m ²	25.000	312.500	12.500	156.250	0	0
aanbrengen van worteldoek	2,5	m ²	25.000	62.500	12.500	31.250	12.500	31.250
aanbrengen van stelconplaten (25 %)	90	m ²	0	0	3.125	281.250	3.125	281.250
verwarmingssysteem: kassenverwarming PE-buis Du 110 mm	3.000	100 m	0	0	125	375.000	0	0
verwarmingssysteem: dubbelfoliesysteem	30	m ²	0	0	0	0	12.500	375.000
aanbrengen van slib/grindkisten	3.000	stuk	42	126.000	22	66.000	22	66.000
verhardingen (blokkenmat)	20	m ²	1.500	30.000	600	12.000	600	12.000
afvalwaterpomp, circa 50 m ³ per uur	14.000	stuk	1	14.000	0	0	0	0
afvalwaterpomp, circa 25 m ³ per uur	12.000	stuk	0	0	1	12.000	1	12.000
circulatiepomp verwarming, circa 250 m ³ per uur	30.000	stuk	0	0	2	60.000	2	60.000
condensor (cap. 3 ton stoom p.u. gem.), A = 50 m ² *	50.000	stuk	0	0	1	50.000	1	50.000
eenmalige kosten/stelpost	50.000		1	50.000	1	50.000	1	50.000
uitvoeringskosten/algemene kosten/winst en risico	500.000		1	500.000	1	500.000	1	500.000
totaal in f				1.542.500		1.716.250		1.560.000

Versnelde rijping 1 = met buizensysteem.

Versnelde rijping 2 = met dubbelfoliesysteem.

* A = 20 m² zou volstaan bij een gemiddeld verbruik van 2,3 ton per uur.

Een condensor van 15 ton stoom per uur zou circa f 100.000,- gaan kosten.

E2 Exploitatieberekeningen

Tabel E2. Exploitatiekosten op basis van een grondprijs van *f* 100,- per m² en een stoombehoefte van 13.800 ton per jaar.

kostenpost	kosten (<i>f</i>)	eenheid	traditioneel	versnelde rijping	versnelde rijping
				buizensysteem	dubbelfolie
vaste kosten:					
afschrijving van depot			154.250	171.625	156.000
grondgebruikskosten			367.000	191.000	191.000
loon van toezichthouder	50.000,-	per jaar	50.000	50.000	50.000
onderhoud			46.275	51.488	46.800
subtotaal			617.525	464.113	443.800
variabele kosten:					
inhuur van mensen en materieel	1.000,-	per dag	370.000	363.000	363.000
afvoerkosten van water, lozingsheffing	100,-	per IE	13.500	2.300	2.300
verwarmingskosten	6,-	per ton stoom	0	82.800	82.800
elektriciteit	0,15	per kWh	0	36.168	36.168
afvoer van product (herbruikbaar)	0,-	per ton	0	0	0
afvoer van product (in werken)	15,-	per ton	79.500	75.000	75.000
afvoer van product (niet toepasbaar*)	125,-	per ton	525.000	500.000	500.000
subtotaal			988.000	1.059.268	1.059.268
totaal			1.605.525	1.523.380	1.503.068

* De stortkosten bedragen circa *f* 125,- per ton, dit is exclusief milieuheffing. De partij zal daarom vergezeld moeten gaan van een verklaring van TCG.

Tabel E3. Elektriciteitsverbruik.

pomp	kW	draaiuren	factor	jaarverbruik
50 m ³ /uur	1,5	116	1	174
25 m ³ /uur	1,1	39	1	43
2.250 m ³ /uur	55	8.760	0,25	240.900
			totaal kWh	241.117

Tabel E4. Exploitatiekosten op basis van een grondprijs van f 25,- per m².

kostenpost	kosten (f)	eenheid	traditioneel	versnelde rijping	versnelde rijping
				buizensysteem	dubbelfolie
vaste kosten:					
afschrijving van depot			154.250	171.625	156.000
grondgebruikskosten			91.750	47.750	47.750
loon van toezichthouder	50.000,-	per jaar	50.000	50.000	50.000
onderhoud			46.275	51.488	46.800
subtotaal			342.275	320.863	300.550
variabele kosten:					
inhuur van mensen en materieel	1.000,-	per dag	370.000	363.000	363.000
afvoerkosten van water, lozingsheffing	100,-	per IE	13.500	2.300	2.300
verwarmingskosten	6,-	per ton stoom	0	82.800	82.800
elektriciteit	0,15	per kWh	0	36.168	36.168
afvoer van product (herbruikbaar)	0,-	per ton	0	0	0
afvoer van product (in werken)	15,-	per ton	79.500	75.000	75.000
afvoer van product (niet toepasbaar*)	125,-	per ton	525.000	500.000	500.000
subtotaal			988.000	1.059.268	1.059.268
totaal			1.330.275	1.380.131	1.359.818

* De stortkosten bedragen circa f 125,- per ton, dit is exclusief milieuheffing. De partij zal daarom vergezeld moeten gaan van een verklaring van TCG.

Tabel E5. Exploitatiekosten op basis van een stoombehoefte van 6000 ton per jaar.

kostenpost	kosten (f)	eenheid	traditioneel	versnelde rijping	versnelde rijping
				buizensysteem	dubbelfolie
vaste kosten:					
afschrijving van depot			154.250	171.625	156.000
grondgebruikskosten			367.000	191.000	191.000
loon van toezichthouder	50.000,-	per jaar	50.000	50.000	50.000
onderhoud			46.275	51.488	46.800
subtotaal			617.525	464.113	443.800
variabele kosten:					
inhuur van mensen en materieel	1.000,-	per dag	370.000	363.000	363.000
afvoerkosten van water, lozingsheffing	100,-	per IE	13.500	2.300	2.300
verwarmingskosten	6,-	per ton stoom	0	36.000	36.000
elektriciteit	0,15	per kWh	0	36.168	36.168
afvoer van product (herbruikbaar)	0,-	per ton	0	0	0
afvoer van product (in werken)	15,-	per ton	79.500	75.000	75.000
afvoer van product (niet toepasbaar*)	125,-	per ton	525.000	500.000	500.000
subtotaal			988.000	1.012.468	1.012.468
totaal			1.605.525	1.476.580	1.456.268

* De stortkosten bedragen circa f 125,- per ton, dit is exclusief milieuheffing. De partij zal daarom vergezeld moeten gaan van een verklaring van TCG.