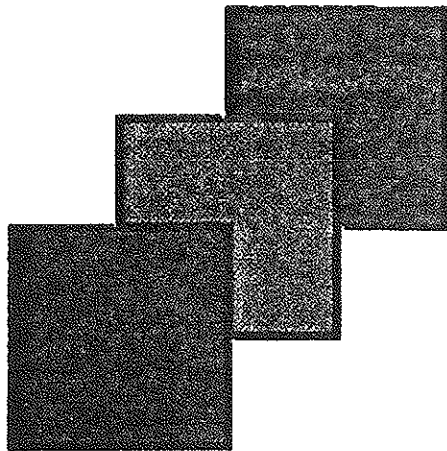
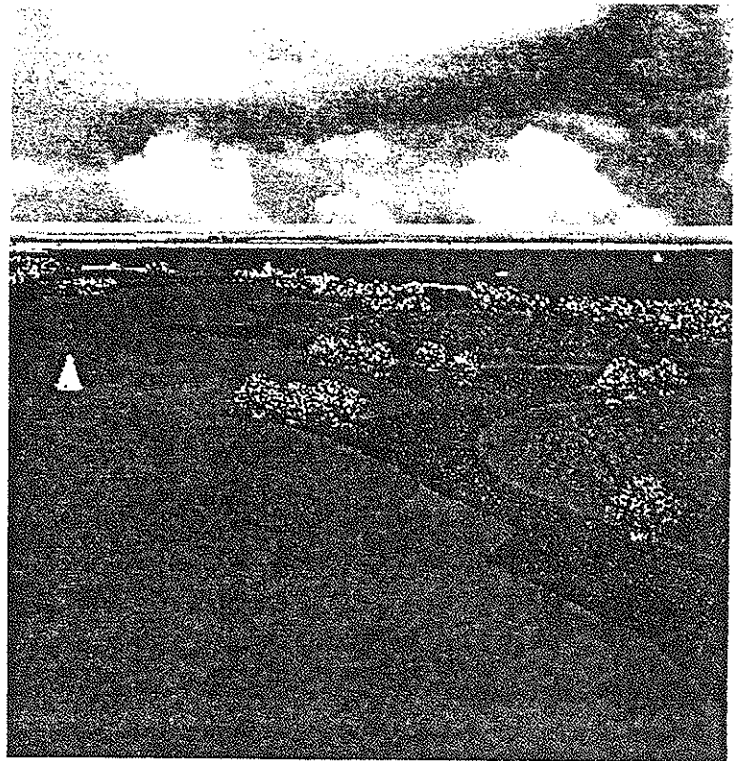


Onderzoek naar recirculatie en in-situ reiniging van retourwater van grootschalige speciedepots

eindrapport



DEPOTEC



DHV Milieu en Infrastructuur
Ingenieursbureau 'Oranjewoud'
Witteveen + Bos Raadgevende ingenieurs



Ministerie van Verkeer en Waterstaat

Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat

Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling RIZA

RIZA

Onderzoek naar recirculatie en in-situ reiniging van retourwater
van grootschalige speciedepots

Eindrapport

Autorisatie	Naam	Paraaf	Datum
Opstellers	Drs. J.L.P.M. van der Pluijm		23-1-'95
	Ir. H.P. Laboyrie		23-1-'95
Controle	ir W.F. de Haan		23-1-'95
Vrijgave	ir C.J. van Hassel		26-1-'95
Status	Eindrapport		
Reg. nr.	950001/RWZ/06		

INHOUDSOPGAVE

SAMENVATTING	1
1. INLEIDING	4
2. AANPAK EN UITGANGSPUNTEN	6
2.1. Aanpak van de inventarisatie van de in-situ-maatregelen	6
2.2. Aanpak van de recirculatieberekeningen	6
2.3. Aanpak van de opzet van een semi-praktijkonderzoek	7
2.4. Uitgangspunten	8
2.4.1. Algemeen	8
2.4.2. Uitgangspunten voor de recirculatieberekeningen	8
2.5. Uitgangspunten voor de z.s.-verwijdering	10
2.6. Uitgangspunten N-verwijdering	11
2.6.1. Algemeen	11
2.6.2. Te verwijderen vracht $\text{NH}_4\text{-N}$ door de in-situ maatregelen	11
3. BESCHRIJVING VAN DE MOGELIJKHEDEN	13
3.1. Inventarisatie van de in-situ maatregelen	13
3.2. Één of meer aflatzones voor retourwater	13
3.2.1. Beschrijving	13
3.2.2. Globale dimensionering	14
3.2.3. Zuiveringsrendement	15
3.2.4. Beheeraspecten	15
3.2.5. Globale kostenbeschouwing	15
3.2.6. Leemten in kennis	15
3.3. Helofytenvelden in het depot	16
3.3.1. Beschrijving	16
3.3.2. Globale dimensionering	16
3.3.3. Zuiveringsrendement	16
3.3.4. Beheeraspecten	17
3.3.5. Globale kostenbeschouwing	17
3.4. Buffering in het depot	17
3.4.1. Beschrijving	17
3.4.2. Globale dimensionering	17
3.4.3. Zuiveringsrendement	18
3.4.4. Beheeraspecten	19
3.4.5. Globale kostenbeschouwing	19
3.4.6. Leemten in kennis	19
3.5. Nitrificatie in het depot algemeen	19
3.6. Nitrificatie met dragermateriaal	20
3.6.1. Beschrijving	20
3.6.2. Dimensionering	21
3.6.3. Zuiveringsrendement	22
3.6.4. Beheeraspecten	22

3.6.5.	Kosten	23
3.6.6.	Leemten in kennis	23
3.7.	Nitrificatie in een "fill-and-draw" systeem	24
3.7.1.	Beschrijving	24
3.7.2.	Dimensionering	24
3.7.3.	Beheeraspecten	24
3.7.4.	Zuiveringsrendement	24
3.7.5.	Kosten	26
3.7.6.	Leemten in kennis	26
3.8.	Nitrificatie door circulatie van water door een zandpakket	26
3.8.1.	Beschrijving	26
3.8.2.	Dimensionering	27
3.8.3.	Beheeraspecten	27
3.8.4.	Leemten in kennis	27
3.9.	In-situ denitrificatie algemeen	27
3.10.	Circulatie van nitraatrijk water door (specie)pakket	28
3.10.1.	Beschrijving	28
3.10.2.	Dimensionering	28
3.10.3.	Beheeraspecten	29
3.10.4.	Leemten in kennis	29
3.11.	Gemengde denitrificatiezone	29
4.	TOETSING EN EVALUATIE VAN DE MAATREGELEN	30
4.1.	Het effect van recirculatie op de zuiveringstechnieken.	30
4.2.	Een of meerdere afgescheiden aflaatzones voor retourwater	30
4.3.	Buffering in het depot	31
4.4.	Helofytenvelden	31
4.5.	Nitrificatie met dragermateriaal	31
4.6.	Nitrificatie met een "fill-and-draw"-systeem	32
4.7.	Nitrificatie in een opwaarts doorstroomd bed	32
4.8.	Denitrificatie in een opwaarts doorstroomd bed	32
5.	RECIRCULATIE VAN HET RETOURWATER	34
5.1.	Mogelijkheden tot recirculatie van retourwater	34
5.2.	Effect van recirculatie op het retourwaterdebiet	35
5.3.	Effect van recirculatie op ammonium en nitraat in het retourwater.	35
5.4.	Effect van recirculatie op opgeloste zware metalen en organische micro- verontreinigingen.	37
5.5.	Effect van recirculatie op fosfaat.	38
6.	LEEMTEN IN KENNIS EN SEMI-PRAKTIJKONDERZOEK	39
6.1.	Leemten in kennis	39
6.2.	Algemene onderzoeksaspecten	39
6.3.	Recirculatie	39
6.4.	Zwevende-stofverwijdering	40

6.5.	Nitrificatie	40
6.6.	Denitrificatie	41
7.	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	42
7.1.	Algemeen	42
7.2.	Zwevende-stofverwijdering	42
7.3.	N-verwijdering	43
7.4.	Recirculatie	43
7.5.	Aanbevelingen	44
	LIJST MET BEGRIPPEN EN AFKORTINGEN	45
	LITERATUURLIJST	47
	BIJLAGEN	
1:	Waterbalans van het depot volgens het Referentie Ontwerp	48
2:	Zeefkromme van specie uit het Ketelmeer	49
3:	Voorbeeld-dimensionering van een fill-and- draw proces.	50
4:	Resultaten van de recirculatie-berekeningen.	51
5:	Hoeveelheden jetwater per m ³ situ-specie afhankelijk van de dichtheid	60

SAMENVATTING

In de komende jaren worden in Nederland enkele grootschalige speciedepots gerealiseerd voor de opslag van baggerspecie uit verontreinigde watergangen. Het retourwater dat uit het depot vrijkomt, vormt een belangrijke emissiebron naar het oppervlaktewater; de lozing is derhalve vergunningplichtig in het kader van de Wet Verontreiniging Oppervlaktewater. De emissie met het retourwater kan ondermeer worden beperkt door:

- het nemen van in-situ maatregelen, waarbij het reinigende vermogen van het depot wordt geoptimaliseerd,
- recirculatie, waarbij in plaats van oppervlaktewater depotwater wordt gebruikt als "jetwater" om de aangevoerde specie verpompaar te maken, en het te lozen retourwaterdebiet wordt beperkt.

De studie bestaat uit drie hoofdonderdelen, namelijk:

- inventarisatie van in-situ maatregelen ter verlaging van de emissie van stikstof (N) en zwevende stof (z.s.);
- modelmatige bepaling van de effecten van recirculatie op de retourwaterproductie en emissie;
- formulering van een opzet voor semi-praktijkonderzoek naar in-situ maatregelen.

De in-situ maatregelen worden beschouwd voor de tussen- en bovenwaterfase. In de onderwaterfase voldoet het retourwater naar verwachting aan de mogelijke lozingseisen. Voor de recirculatie wordt de gehele vulfase beschouwd. De Werkgroep Referentie Ontwerp (WRO) heeft een Referentie Ontwerp gemaakt voor een eiland-depot; dit ontwerp wordt in deze studie als uitgangspunt genomen.

Voor het terughouden van z.s. in het depot zijn twee maatregelen kansrijk, namelijk één of meer afgescheiden aflatzones en buffering van retourwater in het depot. Met beide maatregelen wordt de invloed van de wind op het z.s.-gehalte in het te lozen depotwater beperkt. Buffering in het depot komt als eerste maatregel in aanmerking, omdat hiervoor weinig extra voorzieningen nodig zijn, en het uit kosten oogpunt gunstig is. Bij een grootschalig depot is de hoogte die gereserveerd moet worden voor buffering gering.

Gebruik van meer dan één aflatpunt kan leiden tot beperking van het aantal gevallen waarin de buffering in het depot volledig is benut, en retourwater met een verhoogd z.s.-gehalte moet worden geloosd. Gezien de vrij hoge investeringen, vooral door het leidingwerk, ligt een tweede aflatpunt minder voor de hand.

Helofytenvelden zijn slechts in de consolidatiefase geschikt voor het terughouden van z.s. in het depot, en N en P-fixatie. Zij kunnen onderdeel uitmaken van een ecologisch plan voor het depot in de consolidatiefase, waarbij gestreefd wordt naar een zo gezond mogelijk ecosysteem in het depot. Dit vormt een apart onderwerp van studie.

Met de bovengenoemde maatregelen wordt de goed tot redelijk bezinkbare fractie van het z.s. in het depot teruggehouden. Mocht (incidenteel) een nageschakelde techniek nodig zijn, dan moet de nageschakelde techniek geschikt zijn om juist de fijne z.s.-fractie ($< 0,063$ mm) te verwijderen. Aanvullende bezinking, zonder toevoeging van chemicaliën heeft geen effect. Voor de hand liggende technieken zijn flocculatie en zandfiltratie.

Uit theoretische berekeningen blijkt dat de nitrificatie naar verwachting niet de beperkende stap vormt in de stikstofhuishouding van het depot. De beperkende stap is de denitrificatie, waarschijnlijk door de beperkte beschikbaarheid van een natuurlijke koolstofbron. Dit houdt in dat stikstof in het depot voornamelijk als nitraat aanwezig zal zijn, en dat de ammoniumconcentratie laag blijft. Of in praktijk aanvullende nitrificatie nodig is, moet blijken uit monitoring van het ammoniumgehalte in het retourwater. Mogelijk treedt verhoging van het ammoniumgehalte tot boven de lozingsnorm in de tussen- en bovenwaterfase op. Mocht de retourwaterproductie in de bovenwaterfase door recirculatie tot nul worden gereduceerd, dan zijn aanvullende maatregelen slechts nodig voor de tussenwaterfase.

Een in-situ-nitrificerend systeem moet in staat zijn om een bepaalde ammonium vracht te nitrificeren. Fluctuaties in zuiveringrendement zijn niet zo relevant, omdat deze worden uitgedempt door de lange hydraulische verblijftijd in het depot. Er behoeven dus veel minder strenge eisen te worden gesteld aan de uitvoering en sturing, zodat het systeem vaak eenvoudiger kan worden uitgevoerd dan vergelijkbare nageschakelde technieken.

Gezien het grote aantal leemten in kennis is het niet mogelijk om in dit stadium reeds een betrouwbare selectie te maken tussen de uitgewerkte systemen. Nitrificatie op dragermateriaal in het depot lijkt een kansrijke maatregel, wegens de mogelijk eenvoudige uitvoering en gering onderhoud. Het fill-and-draw-systeem vergt relatief veel voorzieningen.

In principe kan een nitrificerend systeem in het depot nageschakelde zuiveringstechnieken vervangen. Semi-praktijkonderzoek moet echter uitwijzen in hoeverre de maatregelen technisch haalbaar zijn, en welke omzettingssnelheden gehaald kunnen worden.

In-situ heterotrofe denitrificatie is zonder toevoeging van een externe C-bron slechts met uitgebreide maatregelen te bevorderen. Een mogelijke maatregel is bijvoorbeeld: circulatie van nitraatrijk water door een zandpakket, waaraan een organische fractie is toegevoegd, via een uitgebreid drainagesysteem. Toepassing van het zwavel-kalksteenproces is een aantrekkelijke optie, omdat bij deze techniek geen additionele dosering van een C-bron nodig is. Gezien het groot aantal leemten in kennis, is het op dit moment niet mogelijk om de effectiviteit van aanvullende denitrificatie in het depot vast te stellen.

Met recirculatie kan de totale retourwaterproductie tijdens de vulfase met meer dan 60% worden gereduceerd waarvan 30% in de onderwaterfase en 15% in de tussen- respectievelijk bovenwaterfase. Recirculatie in combinatie met een verhoging van de waterstand in het depot leidt bij het Referentie Ontwerp in de bovenwaterfase tot een nullozing.

Het ammonium(NH_4)-N-gehalte wordt niet beïnvloed door recirculatie. Omdat de NH_4 -N-concentraties met name in de bovenwaterfase sterk oploopt wordt in deze fase de grootste vracht reductie bereikt door recirculatie van retourwater (nullozing). Bij volledige recirculatie kan een vrachtreductie van meer dan 80% worden bereikt.

De nitraat(NO_3)-N-concentratie neemt door recirculatie toe. Deze toename kan met de gegeven uitgangspunten en randvoorwaarden een factor vier bedragen aan het einde van de vulfase. Hierdoor is de vrachtreductie aan NO_3 -N minder dan NH_4 -N. Bij volledige recirculatie wordt een vrachtreductie bereikt van meer dan 60% waarvan 30% in de bovenwaterfase.

Bij de opgeloste zware metalen en de organische microverontreinigingen beïnvloedt de recirculatie de concentraties niet. De geloosde vrachten worden verlaagd, omdat door recirculatie het lozingsdebiet afneemt.

1. INLEIDING

In de komende jaren worden in Nederland enkele grootschalige speciedepots gerealiseerd, voor de (tijdelijke) opslag van baggerspecie uit watergangen, waarvan de waterbodem sterk verontreinigd is. Volgens het MER "Berging baggerspecie" en het daarbij horende "Beleidsstandpunt verwijdering baggerspecie" moeten de depots voldoen aan de IBC (isoleren, beheersen en controleren)-criteria. Daarbij is het van belang dat de emissie van verontreiniging uit het depot wordt geminimaliseerd. Een belangrijke emissiebron vormt het retourwater dat uit het depot vrijkomt, en wordt geloosd op het oppervlaktewater.

Lozing van retourwater is vergunningplichtig in het kader van de Wet Verontreiniging Oppervlaktewater (WVO). Het WVO-beleid is gericht op vermindering van de verontreinigingen en het "stand-still"-beginsel. Om invulling te geven aan dit beleid, dient de lozing te worden gesaneerd. Bij retourwater uit speciedepots kan deze sanering op twee fronten geschieden, namelijk door toepassing van nageschakelde zuiveringstechnieken en door het nemen van maatregelen, waarbij het reinigende vermogen van het depot wordt geoptimaliseerd, of de retourwaterproductie wordt gereduceerd.

Nageschakelde technieken zijn reeds onderwerp van studie geweest, en heeft geresulteerd in de Deelnota Zuiveringstechnieken (lit. 2). De studie is uitgevoerd door de Werkgroep Referentie-ontwerp (WRO).

Uit deze studie kwam ondermeer naar voren dat vooral de emissie van stikstof(N) en zwevende-stof (z.s.) beperkt dient te worden. Organische micro-verontreinigingen en zware metalen zijn grotendeels gebonden aan z.s., en worden met het z.s. uit het retourwater verwijderd. De concentraties aan opgeloste verontreinigingen zijn laag, en behoeven niet extra te worden verwijderd. Vooral in de tussen- en bovenwaterfase kan de emissie van zwevende stof en stikstof met het retourwater oplopen. In-situ-maatregelen ter verlaging van de z.s.- en N-emissie, zijn daarom vooral in de tussen- en bovenwaterfase van belang.

Deze studie heeft tot doel om de emissiebeperkende maatregelen te inventariseren, die opgenomen kunnen worden in het depot-ontwerp en het depotmanagement (in-situ maatregelen), en deze te beoordelen op het effect op de emissie en de technische haalbaarheid.

De in-situ maatregelen hebben betrekking op twee aspecten :

- verlaging van het z.s.- en N-gehalte (ammonium en nitraat) in het retourwater, door het reinigende vermogen van het depot te vergroten;
- verlaging van het debiet door recirculatie van het retourwater: bij recirculatie wordt in plaats van oppervlaktewater water uit het depot gebruikt als spoelwater ("jetwater") voor het verpompen van de specie uit de schepen naar het depot. In deze studie worden de mogelijkheden ingeschat voor recirculatie, en de effecten daarvan op de z.s.- en N-emissie. Hierbij wordt gebruik gemaakt van het model dat ontwikkeld is door de Werkgroep Referentie Ontwerp (WRO).

In Nederland is weinig praktijkervaring opgedaan met emissiereducerende in-situ maatregelen bij grootschalige speciedepots. Voorts zijn er in de toepassing van nageschakelde zuiveringstechnieken nog belangrijke leemten in kennis. In deze studie wordt aangegeven hoe een onderzoek naar emissiereducerende in-situ maatregelen kan worden opgezet.

De studie is uitgevoerd door DEPOTEC v.o.f. (Drs. J.L.P.M. van der Pluijm, ir H.P. Laboyrie en ir W.F. de Haan). De studie werd begeleid door ing. J Hartnack (RIZA) als representant van de CUWVO-subwerkgroep "Beoordeling lozingen retourwater uit grootschalige baggerspeciedepots".

De studie bestaat dus uit drie hoofdonderdelen, namelijk:

- inventarisatie van in-situ maatregelen ter verlaging van de emissie van N en z.s:
- modelmatige bepaling van de effecten van recirculatie op de retourwaterproductie en emissie
- de mogelijkheden voor semi-praktijkonderzoek naar in-situ maatregelen.

Hoofdstuk 2 bevat de aanpak en uitgangspunten van de studie. In hoofdstuk 3 worden de in-situ maatregelen geïnventariseerd en beschreven: tevens wordt waar mogelijk een globale dimensionering, zuiveringsrendement en een indicatie van de kosten aangegeven. In hoofdstuk 4 worden de maatregelen getoetst en geëvalueerd. Hoofdstuk 5 bevat de recirculatieberekeningen. Hoofdstuk 6 gaat in op de mogelijkheden voor semi-praktijkonderzoek. Afsluitend worden in hoofdstuk 7 de conclusies en aanbevelingen aangegeven.

2. AANPAK EN UITGANGSPUNTEN

2.1. Aanpak van de inventarisatie van de in-situ-maatregelen

Stap 1: Vaststelling van de maatregelen

Allereerst worden de in-situ maatregelen geïnventariseerd. Omdat er in Nederland nog weinig praktijkervaring is met dergelijke maatregelen in speciedepots, wordt de inventarisatie op theoretische gronden gemaakt.

Stap 2: Globale uitwerking van de maatregelen

De maatregelen worden globaal uitgewerkt betreffende:

- technische uitvoering;
- dimensionering;
- zuiveringsrendement;
- beheeraspecten;
- kosten;
- leemten in kennis.

Stap 3: Toetsing van de maatregelen aan criteria

Deze criteria zijn:

- effecten op de emissie in relatie tot de lozingseisen;
- inpasbaarheid in het depot-ontwerp;
- globale kosten in relatie tot nageschakelde zuiveringstechnieken;
- samenhang met nageschakelde technieken.

stap 4: Evaluatie van de mogelijkheden.

De maatregelen worden onderling afgewogen in samenhang met nageschakelde zuiveringstechnieken.

2.2. Aanpak van de recirculatieberekeningen

Afhankelijk van de fase waarin het depot verkeert, is het van belang te weten wat het effect is van recirculatie. De volgende fasen tijdens de vulperiode worden beschouwd:

- de onderwaterfase, met een waterlaag boven de specie van meer dan 5 m;
- de tussenwaterfase, met een waterschijfdikte van 1 tot 5 m;
- de bovenwaterfase met een waterlaagdikte van 1 m.

De volgende vier scenario's worden doorgerekend:

Tabel 1: Scenario's voor recirculatieberekeningen.

scenario	onderwaterfase	tussenwaterfase	bovenwaterfase
0	GR	GR	GR
1	R	R	R
2	GR	R	R
3	GR	GR	R
4	GR	R	GR

R = recirculatie, GR is geen recirculatie

In scenario 0 wordt geen recirculatie toegepast, en vormt dus de uitgangssituatie.

Scenario's 1 tot en met 3 geven een beeld van de kwaliteit van het retourwater, als recirculatie van af het begin wordt toegepast, of wordt uitgesteld tot de tussen- of bovenwaterfase. Scenario 4 geeft het effect van recirculatie op de emissie als slechts in de tussenwaterfase, waarin de emissie van verontreinigingen het grootst is.

Voor deze scenario's worden voor de vulperiode berekend:

- te lozen retourwaterdebiet;
- ammonium-N en nitraat-N-concentraties en vrachten;
- Cadmiumgehalte en -vracht, als maat voor de zware metalen;
- Benzo(a)pyreen(BaP)- en PCB 153-concentraties en vrachten als maat voor de organische microverontreinigingen;
- fosfaat.

De invloed van recirculatie op de fosfaatconcentratie wordt niet direct berekend. Verondersteld wordt dat de toename in P-gehalte analoog is aan de toename in N-concentratie. Zowel ammonium-N en fosfaat worden gevormd bij de afbraak van organisch materiaal in de specie. De verdere (bio)chemie van ammonium en fosfaat is echter anders. Bij ammonium spelen nitrificatie en denitrificatie een rol, bij fosfaat, onder andere biologische opname in de vorm van polyfosfaat en adsorbtieprocessen. De N- en P- huishouding in dit systeem is zeer complex, waarbij verschillen in N en P zeker optreden. Gezien dezelfde ontstaansbron van opgelost N en P worden deze in deze studie analoog beschouwd.

2.3. Aanpak van de opzet van een semi-praktijkonderzoek

Op basis van de leemten in kennis worden enkele belangrijke onderzoeksdoelstellingen geformuleerd. Het onderzoek bestaat in het algemeen uit voorbereidend laboratorium-onderzoek, op basis waarvan de uitgangspunten voor semi-praktijkonderzoek worden vastgesteld. Het semi-praktijkonderzoek moet leiden tot informatie over:

- de voornaamste ontwerpgrondslagen;
- het zuiveringsrendement;
- de stabiliteit van het systeem;

2.4. Uitgangspunten

2.4.1. Algemeen

In deze studie worden de in-situ maatregelen slechts beschouwd voor de tussen- de bovenwaterfase. In de onderwaterfase voldoet het retourwater naar verwachting aan de mogelijke lozingseisen, en zijn in-situ maatregelen minder relevant. Voor de recirculatie wordt, behalve de tussen- en bovenwaterfase, tevens de onderwaterfase beschouwd.

Recirculatie en in-situ maatregelen worden apart van elkaar beschouwd, waarbij voor de in-situ maatregelen als uitgangssituatie geldt de situatie waarin geen recirculatie wordt toegepast.

Een eiland-depot, ontworpen in het kader van de Werkgroep Specie Depots (WRO) wordt in deze studie als uitgangspunt genomen (lit 1). Enkele belangrijke uitgangspunten zijn in tabel 2 opgenomen.

Tabel 2: Karakteristieken van het eilanddepot volgens het referentie-ontwerp (lit 1).

omschrijving	waarde	eenheid
depotcapaciteit circa	27 miljoen	m ³
oppervlakte	220	ha
vultijd - onderwaterfase (waterschijfdikte > 5 m) - tussenwaterfase (waterschijfdikte 1-5 m) - bovenwaterfase (waterschijfdikte 1 m)	13 0-6 6-8,5 8,5-13	jaar
aanlegdiepte	25	m-NAP
dijkhoogte	5	m
waterschijf boven het specieniveau, minimaal	1	m

2.4.2. Uitgangspunten voor de recirculatieberekeningen

In deze studie worden de uitgangspunten gehanteerd uit de WRO-rapportages. Een nadere onderbouwing is in de WRO rapporten terug te vinden (lit 1).

- 1 De waterbalans is weergegeven in bijlage I. De dijkse kwel en de inzijging zijn op nul gesteld. Ook in de bovenwaterfase wordt boven het slib altijd een waterschijf van minimaal 1 meter dikte aangehouden.
- 2 De concentratie aan verontreinigingen in de gehele waterschijf boven de specie zijn (nagenoeg) homogeen, zodat de concentraties in het retourwater gelijk zijn aan de gemiddelde concentratie in het depotwater.
- 3 Voor de berekening van de z.s-gehalten wordt gebruik gemaakt van de windgegevens van het station Houtribsluizen bij Lelystad. De overschrijdingskans van de berekende z.s-concentratie

bedraagt 50%.

4 De slibkarakteristieken en stofeigenschappen zijn weergegeven in tabellen 3 en 4.

Tabel 3: Karakteristieken van de baggerspecie.

grootheid	waarde	eenheid
slibfractie van gestorte specie met diameter $< 63 \mu\text{m}$	54	%
dichtheid in-situ specie (direct na opbaggeren)	1.430	kg/m^3
stordichtheid van het mengsel	1.200	kg/m^3
dichtheid van droge stof	2.500	kg/m^3
concentratie van organische stof	10,6	% van d.s.
DOC-gehalte in poriënwater*	50	mg/l
valsnelheid van het slib	0,1	mm/sec
hoeveelheid verontreinigd materiaal	11 miljoen	ton

* In praktijk worden lagere waarden verwacht.

Tabel 4: Stofkarakteristieken als invoerparameters voor de modelberekeningen.

component	situ-concentratie $\mu\text{g/l}$	K_d^* l/g	$\log K_{ow}$	concentratie in poriënwater mg N/l
cadmium	16.000	153		
benzo(a)pyreen	950		6	
PCB 153	94		6,57	
$\text{NO}_3\text{-N}$				5
$\text{NH}_4\text{-N}$				120

* gemiddelde van een range van K_d -waarden.

De dichtheden van de situ-specie (direct na het opbaggeren) en de specie bij storten zijn sterk praktijk-afhankelijk. Deze dichtheden bepalen onder andere de hoeveelheid jetwater die per m^3 situ-specie moet worden toegevoegd (zie bijlage V). Dit gegeven is van zeer groot belang voor de waterbalans. Bij de gegevens in tabel 3 moet per m^3 situ-specie $1,15 \text{ m}^3$ jetwater worden toegevoegd. In praktijk kan dit oplopen tot $3 \text{ à } 7 \text{ m}^3$ per m^3 situ specie. Nader onderzoek op dit punt is dus gewenst.

De nitrificatiesnelheid is $0.05/\text{dag}$.

De denitrificatiesnelheid is $0.02/\text{dag}$.

Deze snelheden zijn ontleend aan uit een onderzoek naar de effecten van berging in diepe zandwinputten, door het Waterloopkundig Laboratorium in 1989. Voor de beantwoording van de vraag of deze waarden ook gelden voor speciedepots, is nader onderzoek nodig.

- 5 De atmosferische-depositie en de waterkwaliteit van het Ketelmeer hebben geen invloed op de retourwater kwaliteit.
- 6 de watertemperatuur in het depot is 5 °C
In praktijk is de temperatuur van de waterschijf afhankelijk van onder andere het seizoen. Voorts heeft de waterschijf een temperatuurgradiënt over de diepte. Bij een dunnere waterschijf verloopt de opwarming en afkoeling van de waterschijf aanzienlijk sneller. Gezien het feit dat de temperatuur de omzettingssnelheden in het depot beïnvloeden, is nadere inventarisatie gewenst.
- 7 de specie wordt met een diffuser in het depot gebracht.

2.4.3. Lozingseisen

In lit. 3 zijn de volgende lozingseisen geformuleerd:

Tabel 5: Mogelijke lozingseisen aan retourwater uit omdijkte depots

parameter	eis	onderzoeksverplichting met eis	onderzoeksverplichting
debiet	recirculatie	maximaal hergebruik	
z.s.	onderwaterfase 50 mg/l tussen- en bovenwaterfase 20 mg/l	in-situ en nageschakeld 20 mg/l	
ammonium-N			in-situ en nageschakeld 15 mg NH ₄ -N/l
nitraat-N			in-situ denitrificatie

Voor nitraat zijn nog geen lozingseisen geformuleerd.

2.5. Uitgangspunten voor de z.s.-verwijdering

De slibkarakteristieken zijn opgenomen in tabel 6. Voor de korrelgrootteverdeling wordt gebruik gemaakt van zeefkrommen van slib uit het Ketelmeer (zie bijlage 2). De onderstaande tabel geeft hiervan een samenvatting.

Tabel 6: Korrelgrootteverdeling van het slib uit het Ketelmeer.

fractie (mm)	percentage t.o.v. totaal droge stof
> 0,063	7,5
< 0,063	92,5
< 0,16	32,6
< 0,02	10,8

Aangenomen wordt dat het z.s. in het water dezelfde grootteverdeling heeft. Deze aanname moet in de praktijk worden getoetst. Mogelijk bevat de waterschijf slechts de kleinste, moeilijk bezinkbare

fractie.

De invloed van wind op het z.s.-gehalte in het depot is modelmatig beschouwd in lit 1, en wordt voor deze studie als basis gebruikt.

2.6. Uitgangspunten N-verwijdering

2.6.1. Algemeen

De biologische N-verwijdering valt uiteen in nitrificatie en denitrificatie.

Nitrificerende bacteriën zijn autotroof en kenmerken zich door een lagere groeisnelheid, die afhankelijk is van ondermeer de temperatuur en zuurstofgehalte. Een nitrificerende populatie kan zich slechts handhaven en ontwikkelen als de aanwas groter is dan de afvoer uit de aerobe zone (met het retourwater).

Denitrificerende bacteriën zijn heterotroof en denitrificeren slechts onder anoxische omstandigheden en als een geschikte organische koolstof(C)-bron aanwezig is. Toevoeging van een externe koolstof(C)-bron vormt geen reële optie gezien de grootschaligheid. Gebruik moet worden gemaakt van het koolstof in de organische fractie van de specie of de endogene denitrificatie van aanwezige (denitrificerende) biomassa. Denitrificatie treedt bij voorkeur op aan de waterstroom die voorafgaand is genitrificeerd.

Een autotroof biologisch nitrificerend systeem waarbij geen organische C-bron nodig is, is het zwavel-kalksteenproces (zie de Deelnota Zuiveringstechnieken, lit. 2).

2.6.2. Te verwijderen vracht $\text{NH}_4\text{-N}$ door de in-situ maatregelen

Om te voldoen aan de lozingseis van 15 mg $\text{NH}_4\text{-N/l}$ moet een extra N-vracht worden genitrificeerd. De netto $\text{NH}_4\text{-N}$ -produktie is gelijk aan de $\text{NH}_4\text{-N}$ -produktie in de specielaag minus de nitrificatie in het depot. Uitgaande van een "steady state", waarin geen accumulatie van N in het depot optreedt, is de netto $\text{NH}_4\text{-N}$ -produktie gelijk aan de vracht die met het retourwater wordt geloosd. De extra te nitrificeren N-vracht die met de in-situ maatregelen moet worden omgezet, kan met de volgende formule worden beschreven:

$$\text{extra te verwijderen N-vracht} = Q_{\text{retourwater}} \times (C_{\text{NH}_4\text{-N}} - 15 \text{ mg N/l})$$

met $Q_{\text{retourwater}}$ = retourwaterdebiet

$C_{\text{NH}_4\text{-N}}$ = ammonium-N-concentratie zonder in-situ maatregelen

15 mg N/l = lozingsnorm voor $\text{NH}_4\text{-N}$

$Q_{\text{retourwater}}$ en $C_{\text{NH}_4\text{-N}}$ zijn ondermeer afhankelijk of al dan niet recirculatie wordt toegepast.

Dit wordt in hoofdstuk 5 bepaald. In deze studie worden de maatregelen beschouwd als geen recirculatie wordt toegepast.

Tabel 7: Te nitrificeren N-vrachten zonder recirculatie.

	tussenwaterfase	bovenwaterfase
retourwaterdebiet zonder recirculatie (m ³ /d)*	6.000	1.000
NH ₄ -N gehalte zonder in-situ maatregelen (mg N/l)*	45	80
netto gevormde NH ₄ -N-vracht (kg N/d)	270	80
te lozen NH ₄ -N-vracht bij 15 mg N/l in retourwater (kg N/d)	90	15
extra te nitrificeren NH ₄ -N-vracht (kg N/d)	180	65

* uit lit 2

De vrachten wijken af van de vrachten berekend in lit 1, omdat daarin een ander vulscenario is aangenomen (zie verder lit 3.).

Een betere nitrificatie leidt tot een verhoging van het NO₃-N-gehalte in het retourwater. Een deel van het extra gevormde nitraat wordt gedenitrificeerd in het depot.

3. BESCHRIJVING VAN DE MOGELIJKHEDEN

3.1. Inventarisatie van de in-situ maatregelen

Tabel 8 geeft een overzicht van de mogelijkheden die in deze studie worden uitgewerkt. Recirculatie wordt apart uitgewerkt in hoofdstuk 5.

Tabel 8: Overzicht van de in-situ maatregelen ter vermindering van de emissie uit het depot met het retourwater.

maatregel	reductie van	uitgewerkt in hoofdstuk/par.
recirculatie: gebruik van retourwater als spoelwater bij het inbrengen van de specie	debiet alle verontreinigingen	hoofdstuk 5
één of meer afgescheiden aflatzones voor retourwater	zwevende-stof	3.2
versneld opvullen van het depot rondom het aflatpunt en aanplant van helofytenvelden	zwevende-stof N-vracht	3.3
buffering in het depot	zwevende-stof pieken in retourwaterdebiet	3.4
nitrificatiezone: - met dragermateriaal - als "fill-and draw"-systeem - circulatie van zuurstofrijk water door zandpakket	ammonium-stikstof	3.5
		3.6
		3.7
denitrificatiezone: - circulatie nitraatrijk water door zandpakket - gemengde denitrificatiezone	nitraat-stikstof	3.9
		3.10

3.2. Één of meer aflatzones voor retourwater

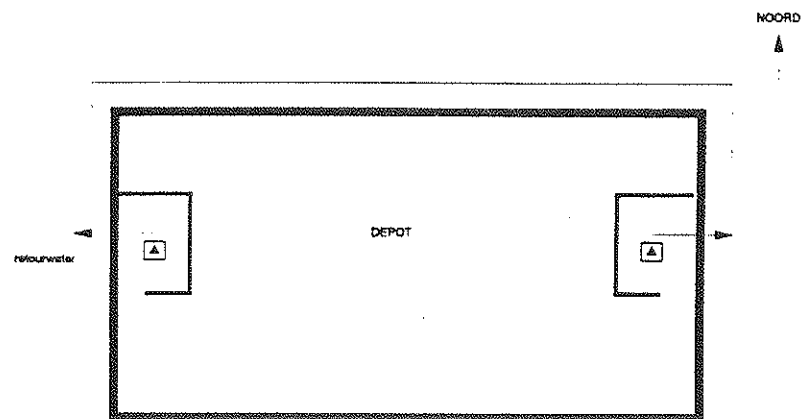
3.2.1. Beschrijving

Het retourwater wordt afgelaten uit een zone die is afgeschermd met een damwand. Hierdoor wordt bij het aflatpunt van het retourwater een rustige zone gecreëerd, waarin de door wind opgewoelde specie weer gedeeltelijk kan bezinken. Bij voorkeur wordt het retourwater afgelaten vanuit de bovenste waterlaag. Voorts wordt de aflatzone niet met specie gevuld waardoor deze diep blijft. Hierdoor wordt ook de interactie tussen de specie en de bovenstaande waterlaag in de omgeving van het aflatpunt beperkt.

Voor de aflat van het retourwater is het z.s.-gehalte ter plekke van het aflatpunt relevant. In lit 1 is modelmatig aangetoond dat de invloed van windgolven op het z.s.-gehalte zeer groot is. Factoren van belang zijn hierbij de windsnelheid, -richting, -duur en de frequentie waarin een situatie voorkomt. Vooral bij waterschijfdikten kleiner dan 1,5 meter kan door windgolven, het z.s. tot

100 à 200 mg/l oplopen. Hierbij is een uniform z.s.-gehalte in de gehele waterschijf aangenomen. De invloed van golven is echter veel kleiner aan de kant van het depot, waarvan de wind vandaan komt. Aan die kant is het z.s.-gehalte derhalve lager dan aan de overkant van het depot. Voorts kan het z.s.-gehalte ter plekke van het aflatpunt hoog zijn omdat in de buurt specie wordt gestort.

Indien in het ontwerp meerdere aflatzones worden opgenomen, bijvoorbeeld één aan de westkant en één aan de oostkant, kan worden geanticipeerd op effecten van wind en windrichting en stortplek op het z.s.-gehalte. Beide aflaten kunnen worden voorzien van een monitoring van z.s., bijvoorbeeld met een troebelheidsmeting. Op het punt met het laagste z.s.-gehalte wordt het retourwater afgelaten. Aanvullend kunnen in de aflatzone periodiek poly-electrolyt (PE) en/of flocculanten worden toegevoegd, ter vergroting van de bezinkbaarheid. Deze toevoeging hoeft slechts incidenteel te zijn, namelijk in perioden, waarin het z.s.-gehalte te hoog is. Gestreefd moet worden naar een minimale dosering van PE/flocculanten, gezien de mogelijke milieubezwaarlijkheid van deze stoffen. De milieubezwaarlijkheid van PE is momenteel onderwerp van discussie¹



Figuur 1: Een of meer afgescheiden aflatzones in het depot.

De extra voorzieningen bestaan dus uit:

- een aflatconstructie (voor tweede aflatpunt)
- leidingen;
- twee damwanden.
- eventueel een PE-doseerinstallatie

3.2.2. Globale dimensionering

Om enige additionele bezinking in de aflatzone te bereiken, zijn een volume met een laminaire stroming en een bepaald oppervlak nodig. Het water wordt afgelaten aan het oppervlak van de waterlaag. Uit zeefkrommen van slib uit het Ketelmeer blijkt de grootste fractie van het slib een korrelgrootte tussen 16 en 63 μm te hebben (zie bijlage 2). Uitgaande van een soortelijke massa

¹ zie Rapport Milieugevoeligheid PE, concept RIZA i.s.m. ingenieursbureau BKH.

van de deeltjes van 2.500 kg/m^3 (zie tabel 3) is een oppervlaktebelasting van 0,07-0,2 m/h nodig. Het benodigde oppervlak van de aflaatzone is in de tussenwaterfase dan 1.250 à 3.600 m², of wel een bassin van minimaal bijvoorbeeld 20 x 60 m. De minimale diepte is circa 2 m.

De hoogte van de damwand moet berekend zijn op een niveaustijging in het depot van -4,5 m tot + 4,8 m NAP = 9,3 m (zie bijlage 1). De damwand is niet waterkerend omdat de waterniveau's aan weerszijde van de wand gelijk zijn. Een stalen damwand komt het meest in aanmerking.

Aan extra leidingen bij een extra aflaatzone is circa de helft van de omtrek van het depot nodig. Is het depot vierkant, met een lengte van 1.500 m, dan is 3 km leiding nodig.

3.2.3. Zuiveringsrendement

In lit 1 is reeds aangegeven dat zonder windinvloeden het z.s.-gehalte in het retourwater 20 à 30 mg/l bedraagt (bij waterschijfdikte kleiner dan 1,5 m). Dit is daarom het minimale z.s.-gehalte die met deze maatregel kan worden gehaald. Het water nabij het aflaatpunt kan een hoger z.s.-gehalte vertonen door stromingen in het depot, waardoor het water wordt opgemengd met water met een hoger z.s.-gehalte. De stromingskarakteristieken van de waterlaag in het depot zijn echter niet bekend, en vormen een leemte in kennis.

Uitgaande dat de fractie groter dan $16 \mu\text{m}$ voor 90% bezinkt, dan is het totaal-rendement op de z.s. verwijdering circa 60%. Voorts worden pieken in z.s.-gehalte afgevlakt. Met incidentele PE-dosering kan het rendement verder worden verhoogd.

3.2.4. Beheeraspecten

De aflaatzone heeft nauwelijks onderhoud en beheer. Incidenteel moet het bezonken materiaal in de aflaatzone worden verwijderd, bijvoorbeeld met een zuiger. Het materiaal kan buiten de aflaatzone worden in het depot gestort.

3.2.5. Globale kostenbeschouwing

De extra kosten zijn investeringskosten voor de extra voorzieningen.

De kosten van een damwandconstructie (op het horizontale deel van het talud onder water) zijn naar schatting f450.000,-- per aflaatzone (circa f4.500,-- per strekkende meter). De prijs van een extra aflaatpunt is sterk afhankelijk van de uitvoering en zijn in dit stadium niet in te schatten. Indien voor de leidingen een prijs van f250,-- per meter wordt aangenomen, zijn de kosten voor 3 km leiding circa f750.000,--.

3.2.6. Leemten in kennis

De belangrijkste leemte in kennis betreft de bezink-eigenschappen van het z.s. in het retourwater, en de invloed van de wind op het z.s.-gehalte ter plekke van het aflaatpunt.

3.3. Helofytenvelden in het depot

3.3.1. Beschrijving

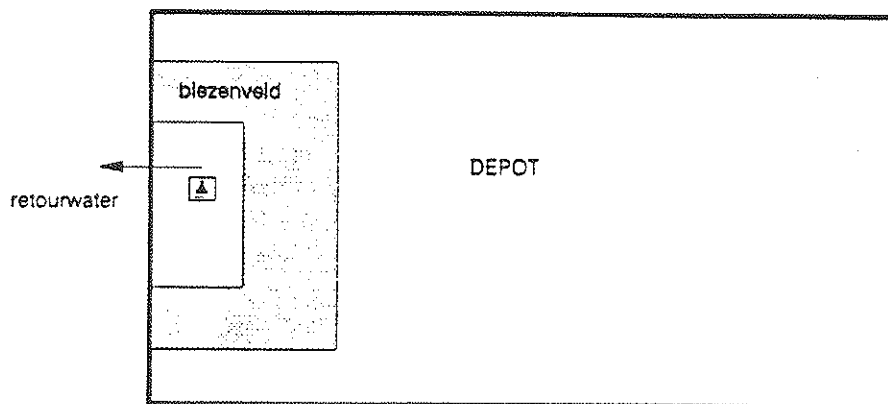
Het depot rondom de aflaatzone(s) wordt versneld in de bovenwaterfase gebracht. Vervolgens worden op deze lokatie(s) helofytenvelden aangeplant. Helofyten bestaan uit rietachtige planten. Deze helofytenvelden zorgen voor beperking van de windinvloeden, zodat het z.s. bezinkt. Tevens wordt stikstof en fosfaat gefixeerd. Voor N- en P-verwijdering moet periodiek worden gemaaid, en moet het maaisel worden afgevoerd.

Voorts kunnen de helofytenvelden ook worden uitgevoerd als filters, waarbij de helofyten worden geplant op een bed, waaronder zich een drainagesysteem bevindt. Het bed wordt neerwaarts doorstroomd. Dit concept leidt tot een verbeterde stikstoffixatie en z.s.-verwijdering ten opzichte van helofytenvelden. Helofytenvelden zetten CO₂ om in organisch koolstof. Door rotting komt een deel van het gevormde organische koolstof beschikbaar voor de denitrificatie, waardoor in een helofytenveld hogere denitrificatiesnelheden worden bereikt (lit 9).

Deze oplossingen zijn slechts relevant aan het einde van de vulfase van het depot, als in de zone rond het aflaatpunt geen specie meer wordt opgebracht. Het is een zeer nuttige maatregel in de consolidatiefase van het depot. In het kader van deze studie, waarin slechts de vulfase wordt beschouwd, zijn helofytenvelden dus niet zo relevant.

3.3.2. Globale dimensionering

Uitgaande van aanplant in de bovenwaterfase met een retourwaterdebiet van 1.000 m³/d en een oppervlaktebelasting van 20 m³/ha/d is een oppervlakte nodig van 50 ha, circa een kwart van het totale depotoppervlak. Met dit oppervlakte aan helofytenvelden wordt vooral in de zomer tevens een aanzienlijke reductie van de N-emissie bereikt. Deze maatregel is slechts mogelijk als de vulfase



Figuur 2: Helofytenveld rond het aflaatpunt.

3.3.3. Zuiveringsrendement

Tijdens de vulfase zijn helofytenvelden dus maar zeer beperkt toepasbaar, en hebben derhalve dus weinig invloed op de emissie tijdens de vulfase.

Helofytenvelden zijn zeer efficiënt in de verwijdering van z.s.. In lit 9 wordt de jaarlijkse N- en

P-verwijdering globaal geschat op 213 kg N/ha en 46 kg P/ha. Bij een oppervlak van 50 ha kan jaarlijks 10,6 ton N worden gefixeerd. Als het gehele depot wordt beplant (220 ha), dan kan in theorie de volledige N-produktie (29 ton N/j in de bovenwaterfase) worden gefixeerd. In lit 9 worden echter rendementen voor N-verwijdering van 30% gegeven.

3.3.4. Beheeraspecten

Helofytenvelden zijn zeer onderhoudsarm. Oogsten van de helofyten is voor z.s. -verwijdering niet nodig. Voor de N- en P-verwijdering moeten de velden periodiek worden geoogst, bij voorkeur in augustus/september (lit. 9).

3.3.5. Globale kostenbeschouwing

De extra kosten voor de helofytenvelden bestaan slechts uit de aanplant en oogsten van de helofyten. De kosten van helofytenvelden zijn dus laag.

3.4. Buffering in het depot

3.4.1. Beschrijving

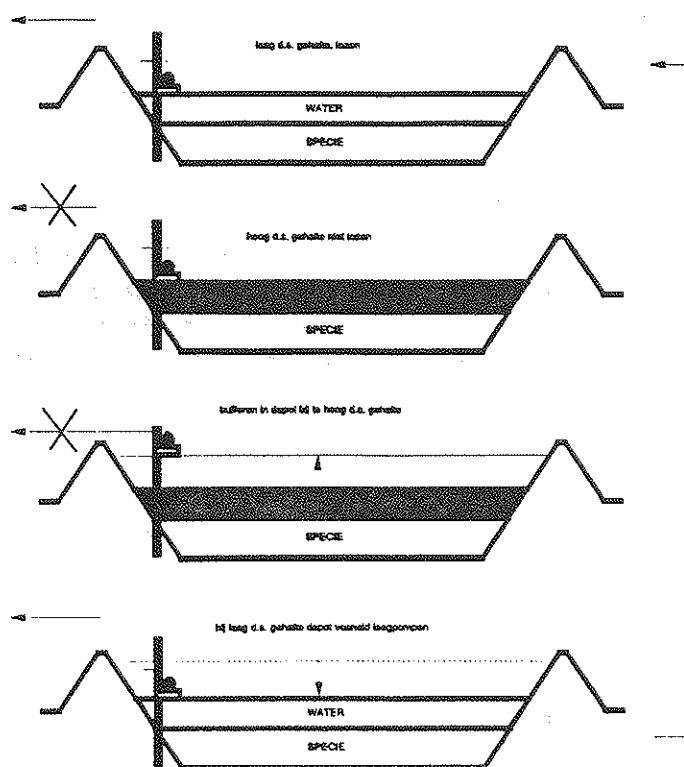
Een bepaalde hoogte in het depot wordt gereserveerd voor buffering van retourwater in het depot. Voldoet het te lozen retourwater niet aan de kwaliteitseisen, dan wordt lozing van retourwater gestopt, en stijgt het waterniveau in het depot langzaam. Op het moment dat het water weer aan de eisen voldoet, wordt het retourwater versneld afgelaten (zie figuur 3). Het af te laten water wordt voorzien van een monitoring voor z.s., bijvoorbeeld in de vorm van een troebelheidsmeter. Wordt een te hoog z.s. gehalte gemeten, dan wordt de afvoerpomp van retourwater automatisch uitgeschakeld. Bij meerdere afluutpunten, kan via een PLC-besturing geregeld worden dat bij het punt met het laagste z.s.-gehalte het retourwater wordt afgepompt.

3.4.2. Globale dimensionering

De toelaatbare bufferhoogte in het depot hangt ondermeer samen met de invloed daarvan op de infiltratie van verontreinigingen in de bodem. Als peilbeheersing wordt toegepast, moet het waterniveau mogelijk verder worden verlaagd ten opzichte van een situatie zonder buffering. Als het depot wordt voorzien van een waterdichte onder- en zij-afdichting, dan is het waterniveau in het depot minder relevant voor de emissie naar het grondwater.

Voorts is de niveauverhoging door buffering in het depot slechts zeer tijdelijk: gedurende de meeste tijd van het jaar is het waterniveau conform bijlage 1. De invloed van buffering op de emissie door inzijging van poriewater naar het grondwater is daarom gering.

Op grond van het bovenstaande wordt ervan uitgegaan dat in de tussen- en bovenwaterfase een buffering van 0,1 meter depothoogte acceptabel is. Dit levert de buffervolumina en buffertijden als weergegeven in tabel 9. In de onderwaterfase is naar verwachting buffering niet nodig, omdat het retourwater dan aan de lozingseisen t.a.v. z.s. voldoet.



Figuur 3: Buffering in het depot.

Tabel 9: Overzicht van de buffercapaciteit in het depot in de tussen- en bovenwaterfase.

	tussenwaterfase	bovenwaterfase
bufferhoogte (m)	0,1	0,1
buffervolume (miljoen m ³) circa	0,22	0,22
buffertijd (d)	37	220

Vooral in de bovenwaterfase is de buffertijd zeer lang, door het lage debiet waarmee het retourwater vrij komt (1.000 m³/d). Bij een ander vulregime, waarbij de vulsnelheid in de tussen- en bovenwaterfase groter is, zijn de buffertijden korter, en moet wellicht een groter volume voor buffering worden gereserveerd.

Indien de weersomstandigheden, die leiden tot hogere z.s.-gehalten maximaal 1 maand duren, dan wordt in de tussenwaterfase 8,3 cm, en in de bovenwaterfase 2,7 cm bufferhoogte benut.

Uitgaande van een ledigingstijd van 2 weken, is een extra pompcapaciteit van circa 1.000 respectievelijk 100 m³/h voor de tussen- en bovenwaterfase nodig.

3.4.3. Zuiveringsrendement

Gezien de ruime mogelijkheden tot buffering is het mogelijk om het retourwater af te laten op momenten waarop de windinvloeden op het z.s.-gehalte nihil zijn. Verwacht wordt dat voldoende retourwater kan worden afgelaten op momenten dat het z.s.-gehalte minimaal is. Uit lit 1 blijkt het minimumgehalte circa 20-50 mg/l te zijn.

3.4.4. Beheeraspecten

De buffering in relatie tot het z.s.-gehalte kan geheel worden geautomatiseerd, zodat het beheer eenvoudig is.

3.4.5. Globale kostenbeschouwing

In de bovenwaterfase is slechts een geringe depotdiepte voor buffering nodig. Dit houdt in dat ondanks buffering de depotcapaciteit niet achteruit gaat. Bij een ander vulregime kan dit wel het geval zijn, waardoor de storkosten van de specie veranderen.

Extra kosten komen voort uit grotere pomp(en) voor de afvoer van retourwater en een meet- en regelsysteem. Deze kosten zijn echter laag ten opzichte van een nageschakeld zuiveringssysteem.

3.4.6. Leemten in kennis

De invloed van de wind op het z.s.-gehalte ter plaatse van het onttrekkingspunt van het retourwater is vooralsnog niet bekend. Voorts is de invloed van de bufferhoogte op de inzijging nog niet berekend.

3.5. Nitrificatie in het depot algemeen

Nitrificatie zal in het depot optreden als de nitrificerende bacteriën zich in het depot kunnen handhaven. Voor nitrificeerders die in gesuspenderde vorm groeien, betekent dit dat de afvoer van bacteriën met het retourwater kleiner moet zijn dan de groeisnelheid in het depot. De groeisnelheid van nitrificerende bacteriën kan beschreven worden met de volgende formule (lit 6):

$$\mu_m = \mu_m e^{0,098(T-15)} \times O_2 / (K_{O_2} + O_2) \times (1 - 8,33(7,2 - \text{pH}))$$

waarbij

μ_m = groeisnelheid onder bepaalde condities

μ_m = maximum specifieke groeisnelheid = 0,5 d⁻¹

T = temperatuur (°C), gemiddeld circa 8 °C in het retourwater

O₂ = zuurstofgehalte. In het RO is een zuurstofgehalte van 2-5 mg O₂ aangenomen, gemiddeld wordt uitgegaan van 3 mg/l.

K_{O₂} = zuurstof-halfwaarde constante = 1,3

pH = pH in de waterschijf = 7,2

Deze formule en de bovengenoemde aannamen leiden tot een groeisnelheid van circa 0,35 d⁻¹

Bij een afstervingscoëfficiënt van 0,05 d⁻¹ en een zekerheidsfactor van 2,5 moet de (cel)verblijftijd circa 8,3 dagen zijn.

Bij een meter waterschijf boven de specie is het volume van de waterschijf 2.200.000 m³. Bij een retourwaterafvoer van 6.000 m³/d is de hydraulische verblijftijd (= volume/afvoerdebiet) 330 dagen. Omdat de concentratie van nitrificeerders in het depotwater gelijk is aan die in het retourwa-

ter is hydraulische verblijftijd gelijk aan de gemiddelde verblijftijd van de nitrificerende populatie². De werkelijke verblijftijd is dus circa een factor 40 hoger dan de benodigde verblijftijd voor nitrificatie

In de winterperiode is de groeisnelheid van de nitrificeerders lager, Volgens bovengenoemde formule is de benodigde verblijftijd bij 4 °C circa 12,5 dagen: ook bij deze temperatuur kunnen de nitrificeerders zich in het depot handhaven.

Geconcludeerd kan dus worden dat in theorie in het depot zich een nitrificerende populatie kan ontwikkelen, en dat nitrificatie niet de beperkende factor is in de stikstofhuishouding in het depot. Voor depots met een hoge retourwaterproductie in vergelijking met het volume van de waterschijf (korte verblijftijd) kan nitrificatie wel beperkend zijn.

In praktijk kunnen zich situaties voordoen die de nitrificatie negatief beïnvloeden, bijvoorbeeld algenbloei en eutrofiëring in het depot. Door de aanwezigheid van nutriënten en de lange verblijftijd kunnen zich algen ontwikkelen in het depot. In een stagnante waterschijf drijven deze algen naar het wateroppervlak om het zonlicht optimaal te kunnen benutten. Dit kan leiden tot een sterke daling van het zuurstofgehalte, waardoor de nitrificatie wordt geremd. Voorts kan het water stoffen bevatten die de nitrificatie remmen.

3.6. Nitrificatie met dragermateriaal

3.6.1. Beschrijving

Nitrificeerders bezitten vaak goede hechteigenschappen op dragermateriaal. Het gehechte slib wordt zodoende teruggehouden in het systeem, zodat geen uitspoeling optreedt.

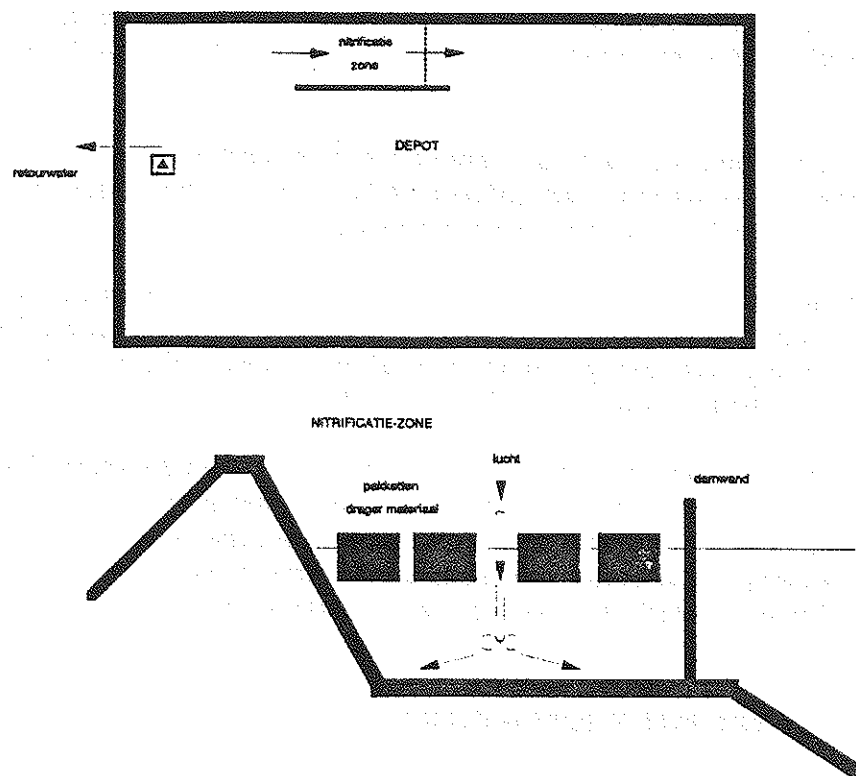
In een zone die door damwanden is afgescheiden worden dragermateriaal, beluchters en een voortstuwer geplaatst. Op het dragermateriaal groeien nitrificerende bacteriën. De beluchters zorgen voor de aerobe omstandigheden, de recirculatie van het water door de nitrificatiezone wordt verzorgd door een voortstuwer.

Voor dragermateriaal zijn er diverse mogelijkheden (lit 4, 5, 8):

- gefixeerd dragermateriaal;
bijv: kooien met kunststof vulmateriaal;
pakketten met verticaal gespannen ruwe draden met een groot specifiek oppervlak, de zogenaamde "ring-laces".
- niet gefixeerd dragermateriaal; bijvoorbeeld zwevende geschuimde blokjes polymeer; het zogenaamde Linpor-materiaal. Dit materiaal heeft een open structuur en een groot specifiek oppervlak (= drageroppervlak/volume = 1.000-2.000 m²/m³), en kan door roosters of kooien worden teruggehouden; dit materiaal wordt reeds toegepast bij RWZI's (lit 8).

De beluchting vindt bij voorkeur onder de pakketten plaats, bijvoorbeeld met bellen- of waterstraalbeluchting. Als in praktijk het zuurstofgehalte in het depotwater hoog is (circa 5 mg O₂/l) kan de benodigde aanvullende beluchting worden verminderd door het waterdebiet door de nitrificatiezone te vergroten. Op deze wijze wordt meer zuurstof in het water benut voor de nitrificatie.

² De gemiddelde verblijftijd van de nitrificerende bacteriën = $(C_{\text{nitrificeerders}} \times V_{\text{waterschijf}}) / (C_{\text{nitrificeerders}} \times Q_{\text{retourwater}})$
Uit deze vergelijking valt de term $C_{\text{nitrificeerders}}$ dus weg. De verblijftijd van de nitrificeerders = $V_{\text{waterschijf}} / Q_{\text{retourwater}}$
= hydraulische verblijftijd.



Figuur 4: Slib-op-dragersysteem.

3.6.2. Dimensionering

De dimensionering wordt vooral bepaald door de nitrificatiecapaciteit van dragermateriaal in de kooien. In lit 4 is de toepassing van dragermateriaal in een zuiveringsinstallatie voor huishoudelijk afvalwater beschreven. In lit 8 (RWZI 2000-onderzoek) is tevens onderzoek verricht naar toepassing van LINPOR-materiaal in een RWZI. Uit lit 8 volgt een nitrificatiesnelheid van 0,1 à 0,2 kg N/m³_{reactor}/d. Dit leidt tot een reactorvolume van 900-1.800 m³ in de tussenwaterfase, en 320-650 m³ in de bovenwaterfase. Voor deze specifieke toepassing kan het nuttig zijn om te kiezen voor een dragermateriaal met een meer open structuur, zodat de biobeschikbaarheid van het ammonium en zuurstof voor de biomassa op het drager materiaal wordt vergroot. De keuze voor het optimale dragermateriaal dient nader te worden onderzocht. Onderstaand wordt een dimensionering weergegeven met een dragermateriaal met een geringer specifiek oppervlak.

De nitrificatie van het water in het depot zal zich in praktijk anders gedragen dan in een RWZI. Door de lage CZV/N- verhouding zal de nitrificatie relatief beter gaan; nadeel is echter de lage temperatuur in de winterperiode.

Tabel 10: Uitgangspunten dimensionering nitrificatiezone met vast dragermateriaal.

	waarde	eenheid
volume dragermateriaal t.o.v. totaal-volume nitrificatiezone	20	%
specifiek oppervlak van het dragermateriaal	200*	m ² /m ³
specifieke nitrificatiesnelheid (bij 10 °C)	2	g N/m ² /d
zuurstofgehalte in het water in de nitrificatiezone	2	mg/l
specifieke zuurstofvraag	4,57	gr O ₂ /gr N-Kj

* sterk afhankelijk van type dragermateriaal, hier wordt uitgegaan van een conservatieve inschatting.

Tabel 11: Dimensionering nitrificatiezone met vast dragermateriaal.

	tussenwaterfase	bovenwaterfase	
benodigd volume dragermateriaal	450	162	m ³
benodigd reactorvolume	2.250	820	m ³
debiet door nitrificatiezone*	600	85	m ³ /h
zuurstofvraag	1.000	356	kg O ₂ /d

* Uitgaande van een effluentconcentratie van 2 mg NH₄-N/l

Mogelijk kan aanvullende beluchting achterwege blijven, indien het debiet door de nitrificatiezone sterk wordt verhoogd. Uitgaande van een O₂-gehalte van 5 mg O₂/l in het depotwater, waarvan circa 3 à 4 mg/l kan worden benut voor nitrificatie moet in de tussenwaterfase circa 8.600 m³/h door de nitrificatiezone worden geleid. In de bovenwaterfase kan dit gereduceerd worden tot 3.100 m³/h. Met behulp van bijvoorbeeld voortstuwers zijn dergelijke debieten eenvoudig te realiseren. De vraag is echter wat de invloed van deze hoge debieten is op de hechting van de bacteriën op het dragermateriaal (uitspoeling).

3.6.3. Zuiveringsrendement

Uit semi-praktijk-onderzoek aan toepassing van dragermateriaal bij nazuivering van huishoudelijk afvalwater bleek een omzettingssnelheid van 2 g N/m²/d bij 10 °C (lit 5,8) en een effluentconcentratie van circa 2 mg NH₄-N/l haalbaar. Deze omzettingssnelheid kan in een praktijkinstallatie leiden tot een voldoende reductie van de N-vracht om de lozingseis te halen.

3.6.4. Beheeraspecten

Het systeem kan continu functioneren. Controle van de werking van de mechanische onderdelen is nodig. Mogelijk is periodiek reinigen van de pakketten nodig, afhankelijk van de mate van aangroei op het dragermateriaal. Gezien de lage BZV-concentratie in het depotwater is de aangroei vrij langzaam, en is reiniging slechts incidenteel nodig.

3.6.5. Kosten

De kosten hangen sterk af van de mogelijke uitvoering. Uit lit 8. blijkt dat met name de kosten voor het dragermateriaal vrij hoog zijn (voor LINPOR: circa $f\ 1.500,-/m^3_{\text{drager}} = f540.000,-$ voor circa $90\ m^3$ linpor dragermateriaal). Hier bij komen de kosten voor voortstuwing en eventueel aanvullende beluchting. Gezien de leemten in kennis is hierover in dit stadium weinig te zeggen. De kosten naar verwachting globaal overeen met een nageschakelde zuiveringstechniek (biorotor). Als de aanvullende beluchting grotendeels achterwege kan blijven, is deze in-situ variant waarschijnlijk goedkoper.

3.6.6. Leemten in kennis

Toepassing van dit systeem bij depot-water is nog onbekend. Leemten in kennis zijn:

- het optimale dragermateriaal en de configuratie;
- benodigde luchtinbreng en optimaal beluchtingssysteem
- bedrijfsvoering.

3.7. Nitrificatie in een "fill-and-draw" systeem

3.7.1. Beschrijving

Bij het fill-and-draw-systeem (ook wel "sequencing batch reactor, SBR, genoemd) wordt een afgesloten compartiment zowel voor nitrificatie als voor bezinking gebruikt. Het compartiment wordt periodiek belucht, zodat nitrificatie kan optreden. Op een bepaald moment wordt de beluchting uitgezet, zodat het slib bezinkt. Vervolgens wordt een deel het water uit de nitrificatiezone afgelaten. Een nieuwe hoeveelheid water wordt vanuit het depot in de nitrificatiezone gebracht en de bovengenoemde cyclus begint opnieuw. Op deze wijze wordt de nitrificerende biomassa in de nitrificatiezone teruggehouden³.

Omdat het systeem bestaat uit een afgesloten compartiment, vormt de stijging van het waterniveau tijdens de vulfase een probleem. Als het waterpeil op het minimum niveau is (-4,5 m NAP), dan is het wellicht nodig het depotwater met pompen in het systeem te brengen, er kan dan wel onder vrij verval worden afgelaten. Is het waterpeil gestegen, dan kan het compartiment wellicht onder vrij verval worden gevuld, en moet het met pompen worden gelegegd. De damwand moet dus waterkerend zijn, en er is altijd een pomp nodig voor de aanvoer of afvoer van water uit het fill-and-draw systeem.

Benodigde voorzieningen zijn:

- een afgesloten bassin door een damwandconstructie;
- een toevoer/afvoerpomp, voorzien van tijdschakeling
- een beluchtingssysteem voorzien van tijdschakeling

3.7.2. Dimensionering

De dimensionering hangt sterk af van de te behalen nitrificatiesnelheid, slibconcentratie- en samenstelling en bezink-eigenschappen van het gevormde slib. Dit zijn op dit moment voor de zuivering van depotwater leemten in kennis. Voor de dimensionering wordt de methode gebruikt beschreven in Metcalf & Eddy (lit 6). De berekening is opgenomen in bijlage 3. Het benodigde totaal-volume van het bassin is bij de voorbeeld-dimensionering circa 3.400 m³.

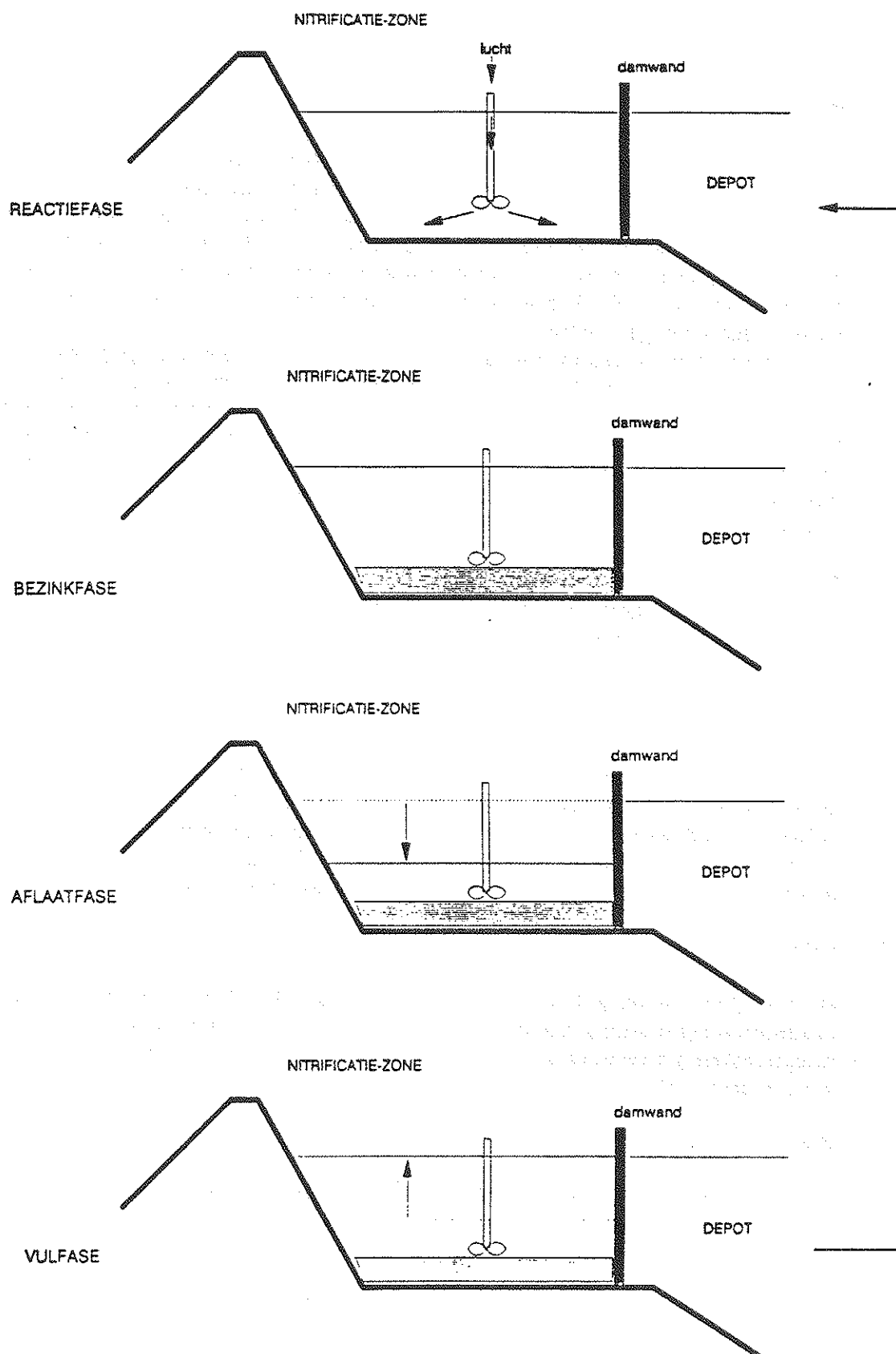
3.7.3. Beheeraspecten

Het bedrijf van het fill-and-draw systeem kan volledig tijdgeschakeld worden uitgevoerd. Voor de procesbewaking is meting van het z.s. en eventueel zuurstof en ammonium nodig. Periodiek moet de tijdschakeling worden aangepast, bijvoorbeeld per seizoen. Het beheer is vergelijkbaar met dat van een nageschakeld zuiveringssysteem.

3.7.4. Zuiveringsrendement

Het fill-and-drawsysteem is in principe in staat om vergaand te nitrificeren. Het fill-and-drawsysteem is gebaseerd op gesuspendeerde groei, die tevens in het depot zelf optreedt. Het systeem heeft daardoor naar verwachting slechts een geringe toegevoegde waarde aan de natuurlijke nitrificatie in het depot.

³ Mogelijk kan ook een denitrificatiefase worden ingelast na de nitrificatiefase. De beluchting wordt uitgeschakeld en mechanisch gemengd. Om hogere denitrificatiesnelheden te bereiken, moet een externe koolstofbron worden toegevoegd. Dit is echter geen uitgangspunt voor deze studie, en wordt daarom niet verder uitgewerkt.



Figuur 5: Fill-and-draw systeem in het depot.

3.7.5. Kosten

Het systeem bevat in principe dezelfde onderdelen als een nageschakeld zuiveringssysteem. De damwand moet zwaar worden uitgevoerd (waterkerend). De kosten van dit systeem zijn naar verwachting te vergelijken met die van een nageschakeld nitrificerend systeem.

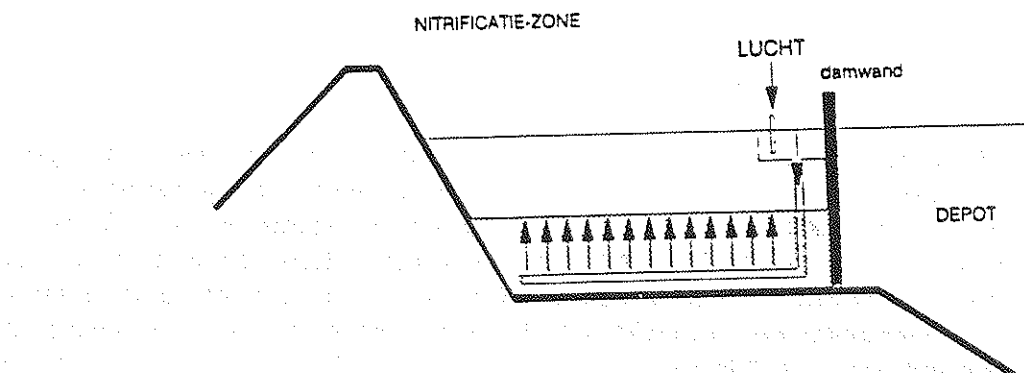
3.7.6. Leemten in kennis

Dit systeem is voor de reiniging van water in depots nog niet toegepast. Zoals reeds aangegeven bij de dimensionering zijn belangrijke ontwerpparameters als te bereiken omzettingssnelheden, bezink-eigenschappen van het slib en beheeraspecten van het systeem niet bekend.

3.8. Nitrificatie door circulatie van water door een zandpakket

3.8.1. Beschrijving

Het water wordt in een compartiment belucht. Vervolgens wordt het water via een drainagesysteem door een zandpakket gepompt. Op de zandkorreltjes ontwikkelen zich onder aerobe omstandigheden nitrificerende bacteriën. Als dragermateriaal is specie minder geschikt: door de opwaartse waterstroom wordt de specie "weggeblazen" vanwege zijn geringe bezinkbaarheid. Een zandbed is in dit opzicht meer bedrijfszeker. Bij deze variant is het technisch moeilijk om de benodigde zuurstof volledig uit het retourwater te betrekken (als bij nitrificatie op dragermateriaal). De hoge debieten die hiervoor nodig zijn zouden leiden tot een groot drainagesysteem.



Figuur 6: Nitrificatie door een zandpakket.

Benodigde voorzieningen zijn:

- een klein bassin met beluchters
- een toevoerleiding met pomp aangesloten op een drainagesysteem
- een zandpakket

3.8.2. Dimensionering

Tabel 18: Globale dimensionering van een nitrificerend zandpakket

	tussenwaterfase	bovenwaterfase	
te zuiveren debiet	500	180	m ³ /h
volumebelasting (lit 4)	0,1	0,1	kg N/m ³ /d
te reinigen N-vracht	180	65	kg N/d
zuurstofinbreng OC (tot 8 mg/l) (lit 4)	2.550	920	kg O ₂ /d
volume zandpakket	1.800	650	m ³
oppervlakte bij een zandpakkethoogte van 1 m	1.800	650	m ²

3.8.3. Beheeraspecten

Bij normaal functioneren vergt het systeem weinig onderhoud. Mogelijk moet periodiek het zandpakket worden schoongespoeld, bijvoorbeeld door het debiet tijdelijk sterk op te voeren. De frequentie van spoelen is in dit stadium moeilijk vast te stellen. Mogelijke storingen kunnen optreden door verstopping van de drainagebuizen en het zandbed. Bij hoge z.s.-gehalten in het depotwater is het wenselijk de pomp uit te schakelen, zodat te snel dichtslibben van het zandpakket wordt vermeden.

3.8.4. Leemten in kennis

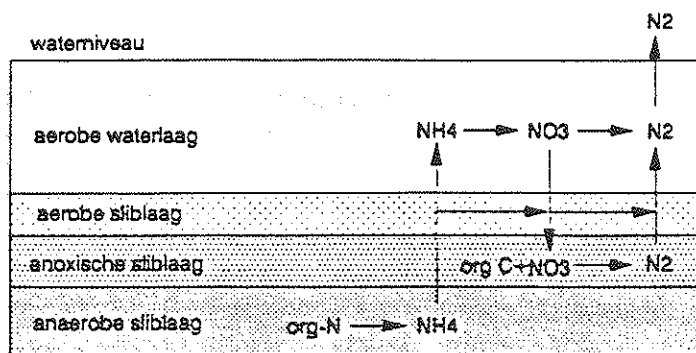
De leemten in kennis zijn overeenkomstig de andere nitrificerende systemen. Onbekend is welke nitrificatiesnelheden bij deze toepassing kunnen worden bereikt.

3.9. In-situ denitrificatie algemeen

Denitrificatie wordt uitgevoerd door heterotrofe bacteriën onder anoxische omstandigheden. In het depot vormt een klein deel van de organische fractie een natuurlijke koolstofbron voor denitrificatie. Door voornamelijk anaërobe afbraakprocessen van deze organische fractie komen organische verbindingen (bijvoorbeeld vetzuren) vrij die door de (denitrificerende) bacteriën worden gebruikt als C-bron. De optimale C:N ratio is circa 2. Dit houdt in dat voor een goede denitrificatie in de tussen- en bovenwaterfase circa 600 kg C/dag moet worden benut voor de denitrificatie. Het is op dit moment niet bekend hoeveel C een speciepakket kan leveren. Dit is ondermeer afhankelijk van de soort specie (organische fractie). Bij methanol is een dosering van circa 1.100 kg methanol/dag nodig.

In figuur 7 wordt schematisch en sterk vereenvoudigd het in-situ nitrificatie- en denitrificatieproces in het depot weergegeven.

Het totale scala aan betrokken processen is zeer complex, en nog slechts voor een klein deel bekend. In lit 1 is een denitrificatiesnelheid aangenomen, die betrekking heeft op de waterschijf. De denitrificatiesnelheid in de waterfase is in praktijk moeilijk te optimaliseren zonder additionele toevoeging van een (oplosbare) C-bron. In lit 7 worden denitrificatiesnelheden aangegeven van 24-141 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{h}$ voor modderig sediment. Voor zanderig sediment is 21 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{h}$ gemeten.



Figuur 7: Vereenvoudigd schema van de stikstofhuishouding in een depot.

De denitrificatie in de anoxische sliblaag is ondermeer afhankelijk van fysisch transport van nitraat van de waterfase naar de anoxische sliblaag, waardoor het nitraat ter beschikking komt voor de denitrificerende bacteriën in de specie.

Maatregelen waarmee de denitrificatiecapaciteit van de specielaag wordt vergroot zijn:

- een betere nitraatbeschikbaarheid in de anoxische specielaag;
- een hogere organische fractie en/of de aanwezigheid van denitrificerende bacteriën.

3.10. Circulatie van nitraatrijk water door (specie)pakket

3.10.1. Beschrijving

Nitraatrijk water, bij voorkeur de afloop van de nitrificatiestap wordt in een drainagesysteem geperst. Op het drainagesysteem bevindt zich een (specie)pakket. In dit pakket treedt denitrificatie op.

Belangrijk is, dat het pakket een hoge organische fractie heeft, en veel denitrificerende bacteriën bevat. Om dit te bereiken kan, als aanvullende maatregel, het pakket eventueel worden verrijkt met organisch materiaal, bijvoorbeeld:

- surplusslib van een rioolwaterzuiveringsinstallatie (RWZI);
- een afvalstroom vanuit bijvoorbeeld de voedingsmiddelenindustrie;
- verzuurd GFT-afval.

Door de opwaartse doorstroming van het pakket wordt de fijne, slecht bezinkbare fractie uit het pakket verwijderd. Indien specie als pakket wordt gebruikt, dient de stroomsnelheid door het pakket laag te zijn.

Voorts kan worden overwogen het pakket op te bouwen uit zwavel-kalksteen. In een zwavel-kalksteenbed treedt autotrofe denitrificatie op (zonder organische C-bron). Dit proces is nader omschreven in de Deelnota Zuiveringstechnieken (lit 2).

3.10.2. Dimensionering

Verwacht wordt dat relatief een groot oppervlak moet worden voorzien van een drainagesysteem en pakket, vanwege de geringe opstroomsnelheden, en de relatief geringe denitrificatiesnelheid door

het relatief geringe aanbod van een natuurlijke C-bron. Onderstaand rekenvoorbeeld maakt dit duidelijk.

In onderzoek aan denitrificatiesnelheden in waterbodems (lit 7) zijn omzettingssnelheden van 24-141 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{h}$ gemeten, afhankelijk van o.a. de temperatuur. In de tussenwaterfase moet circa $535 \cdot 10^6 \mu\text{mol N}/\text{h}$ worden omgezet ($= 180 \text{ kg N} \cdot 1.000/24 \text{ h}/14 \cdot 10^6 = 535 \cdot 10^6 \mu\text{mol}/\text{h}$). Bij de genoemde omzettingssnelheden leidt dit tot een oppervlakte van $535 \cdot 10^6/24$ tot $535 \cdot 10^6/141 = 3,8\text{-}22,3$ miljoen $\text{m}^2 = 380\text{-}2.230 \text{ ha}$!. Dit is dus volgens deze berekeningen niet haalbaar in een depot met een oppervlak van maximaal 220 ha. Ook uit deze berekeningen blijkt dat naar verwachting de natuurlijke denitrificatiecapaciteit onvoldoende is om vergaande nitraatverwijdering te bereiken.

3.10.3. Beheeraspecten

De beheeraspecten zijn conform nitrificatie in een zandpakket (zie par 3.8.3.).

3.10.4. Leemten in kennis

In het voorgaande is reeds aangegeven dat het aantal leemten in kennis voor deze mogelijkheid zeer groot is. De belangrijkste zijn:

- mogelijkheid voor toepassing van een zwavel-kalksteenbed;
- te behalen denitrificatiesnelheden in het pakket, afhankelijk van de te pakketsamenstelling, eventuele toevoeging van een organische fractie;
- de afhankelijkheid van de snelheid van de temperatuur;
- de opzet van het drainagesysteem: doorstroomsnelheid.
- de afbraak van organisch koolstof in het slib

3.11. Gemengde denitrificatiezone

Door een zone te mengen wordt de specie opgewerveld. Hierdoor komt het nitraat in de waterfase beter beschikbaar voor de (denitrificerende) bacteriën op de speciedeeltjes. De zone zou ook kunnen bestaan uit een compartiment van het depot, waarin de aangevoerde specie wordt ingebracht, samen met een hoeveelheid nitraatrijk water (bijvoorbeeld door recirculatie). Dit compartiment moet echter zo goed gemengd worden, zodat de specie grotendeels in suspensie blijft. Hiervoor is naar verwachting veel meng-energie nodig. Een ander nadeel van deze methode is, dat de waterschijf zuurstofrijk is ($2\text{-}5 \text{ mg O}_2/\text{l}$), hetgeen de denitrificatie negatief beïnvloedt. Een mogelijk voordeel van menging zou de betere beschikbaarheid van de aanwezige koolstofverbindingen voor de bacteriën zijn. Dit voordeel is echter betrekkelijk, omdat bacteriën voornamelijk lagere koolwaterstofverbindingen opnemen. Deze worden met name onder anaërobe condities gevormd, dus niet in de gemengde fase.

Geconcludeerd moet worden dat deze variant naar verwachting in praktijk weinig oplevert. Deze variant wordt in deze studie derhalve niet verder uitgewerkt.

4. TOETSING EN EVALUATIE VAN DE MAATREGELEN

De maatregelen die in hoofdstuk 3 zijn beschreven worden getoetst aan de volgende criteria:

- 1 effecten op de emissie, in relatie tot de lozingseisen (zie uitgangspunten)
- 2 inpasbaarheid in het depot-ontwerp
- 3 globale kosten in relatie tot nageschakelde zuiveringstechnieken.
- 4 samenhang met nageschakelde technieken
- 5 leemten in kennis, als aangegeven in het vorige hoofdstuk

4.1. Het effect van recirculatie op de zuiveringstechnieken

Recirculatie leidt tot een aanzienlijke reductie van de emissie, maar tevens verhoging van het $\text{NO}_3\text{-N}$ -gehalte in het depotwater. Dit houdt in dat bij recirculatie een grotere reductie van met name stikstofgehalten in het depotwater moet worden bereikt, om te kunnen voldoen aan de gestelde kwaliteitseisen. Uit tabel 7 blijkt dat zonder recirculatie circa 30% van het N via het retourwater mag worden geloosd. Bij recirculatie, waarbij de het retourwaterdebiet gemiddeld met circa 60% wordt gereduceerd, mag slechts 13% van de N-vracht worden geloosd. Met de in-situ reiniging moet dus 17% extra N worden verwijderd. De dimensionering van technieken voor N-verwijdering zijn in het algemeen lineair met de te verwijderen N-vracht, zodat in dit geval de systemen met recirculatie circa 17% groter moeten worden gedimensioneerd ten opzichte van een situatie zonder recirculatie.

Als de ratio tussen situ-specie en jetwater groter is dan 1,15, bijvoorbeeld 3 à 7, dan liggen zonder recirculatie bovengenoemde verhoudingen heel anders. Echter, bij recirculatie komt per m^3 situ-specie circa 1 m^3 retourwater vrij (afgezien van dijkse kwel, inzijging, neerslagoverschot, die relatief een geringe bijdrage aan het retourwaterdebiet leveren). De genoemde ratio speelt dan geen rol meer.

Door de reductie van het te lozen retourwaterdebiet kan het bezinkoppervlak van de aflaatzones worden gereduceerd. Voorts worden bij buffering in het depot de buffertijden langer.

4.2. Een of meerdere afgescheiden aflaatzones voor retourwater

Met deze maatregelen kunnen windinvloeden op de retourwaterkwaliteit gedeeltelijk worden gereduceerd. In het gunstigste geval zijn de lozingsnormen voor z.s. haalbaar. Effecten van stromingen in het depot op plaatselijke z.s.-gehalten zijn echter niet volledig bekend.

De damwand wordt bij voorkeur geplaatst op een horizontaal deel van het talud onder het waterniveau. Ook de afvoerconstructie voor het retourwater dient daar te worden gebouwd.

Tot aan de bovenwaterfase wordt in het RO het waterpeil constant gehouden op 4,5 m -NAP, om de emissie naar het grondwater te beperken (peilbeheersing). Bij een diepte van de aflaatzone van circa 3 m moet het horizontale deel in het talud op circa 7,5 m -NAP liggen. Komt het specieniveau in de buurt van -4,5 m -NAP, dan stijgt het waterpeil door het vullen van het depot. Met de hoogte van de damwand dient daarmee rekening te worden gehouden. In praktijk is het naar verwachting mogelijk om zo'n horizontaal deel in het depotontwerp op te nemen.

De kosten van de voorzieningen voor een aflaatzone zijn naar schatting lager dan nageschakelde bezinking. Twee aflaatzones vallen duurder uit, gezien de kosten voor een lange leiding, de extra damwand en afvoerconstructie. De lokatie van het aflaatpunt moet gekozen worden aan dezelfde kant als waarvan de wind doorgaans vandaan komt. In Nederland is dit meestal de westelijke kant.

Door deze voorzieningen heeft aanvullende z.s.-verwijdering middels bezinking weinig effect. In dat geval dient de bezinking te worden bevorderd door toevoeging van poly-electrolyt en flocculanten, eventueel in de aflaatzone. De mogelijke milieubezwaarlijkheid van de PE-dosering is hier punt van aandacht. Voorts hoeft de nageschakelde techniek voor verwijdering van z.s. slechts te werken als het water niet aan de kwaliteitseisen voldoet.

4.3. Buffering in het depot

Buffering in het depot kan leiden tot een aanzienlijke reductie van de z.s.-emissie en de daaraan gebonden verontreinigingen. Uitgaande van een retourwaterdebiet van 6.000 en 1.000 m³/d in respectievelijk de tussen- en bovenwaterfase kunnen met buffering lange perioden worden overbrugd, zodat windinvloeden op het z.s. gehalte van het retourwater kunnen worden beperkt. Uitgaande van de gegevens van lit 1 kunnen ook in de tussen- en bovenwaterfase de lozingsnorm van 20-50 mg z.s./l worden gehaald.

Voor het depot-ontwerp betekent buffering dat het waterniveau frequenter fluctueert: deze fluctuaties zijn in de bovenwaterfase echter gering. Gedurende de vulfase varieert het waterniveau al sterk. Hierdoor moeten randvoorzieningen als afvoerconstructie reeds berekend zijn op fluctuaties in waterniveau. De relatief geringe fluctuaties in waterniveau door buffering hebben in dat opzicht geen invloed op het depotontwerp.

In de bovenwaterfase is slechts een geringe bufferhoogte nodig om lange periodes te kunnen overbruggen. Het depot kan daardoor toch volledig worden gevuld. Buffering heeft daarom geen negatieve invloed op de vulcapaciteit van het depot.

De kosten van buffering zijn gering in relatie tot nageschakelde zuiveringstechnieken.

Door de buffering is verwijdering van z.s. slechts incidenteel nodig, namelijk in de gevallen dat de buffering van het depot volledig is benut, en het z.s.-gehalte niet aan de normen voldoet. Het nageschakeld zuiveringssysteem moet dus discontinu kunnen functioneren.

4.4. Helofytenvelden

Helofytenvelden zijn slechts van toepassing aan het einde van de vulfase, en in de consolidatiefase. Helofytenvelden kunnen onderdeel vormen van de inrichting van het ecosysteem, met als doel om in het depot goede leefomstandigheden te creëren voor flora en fauna en om emissies van z.s., N en P uit het depot te minimaliseren. De mogelijkheden daartoe vereisen nader onderzoek, en vallen buiten het kader van deze studie

4.5. Nitrificatie met dragermateriaal

Met deze maatregel kan potentieel de NH₄-N-concentraties tot de lozingsnorm worden gereduceerd. De leemten in kennis zijn echter aanzienlijk. Naar verwachting hoeft slechts een klein deel van het depot te worden gereserveerd voor deze voorzieningen, zodat de invloed op het depot-ontwerp slechts gering is. Benodigde damwanden dienen reeds in de bouwphase van het depot te worden

aangebracht. Overige voorzieningen, als het dragermateriaal en beluchting kunnen later worden aangebracht.

De kosten hangen sterk af van de uitvoering, die slechts op grond van nader onderzoek kan worden bepaald.

4.6. Nitrificatie met een "fill-and-draw"-systeem

Ook deze maatregel biedt mogelijkheden om de ammonium-N-eis te halen. De verwachting is echter dat in het geval de natuurlijke nitrificatie in het depot tekort schiet, het fill-and-drawsysteem weinig kan bijdragen aan verdergaande nitrificatie. De kosten zijn vergelijkbaar met de kosten voor een nageschakeld nitrificerend systeem.

4.7. Nitrificatie in een opwaarts doorstroomd bed

Dit systeem biedt potentiële mogelijkheden om het ammoniumgehalte te verlagen tot de lozingsnorm. Het ruimtebeslag is relatief gering, waardoor de invloed van deze maatregel op het depotontwerp gering is. De kosten zijn naar verwachting van dezelfde orde als van een nageschakeld nitrificerend systeem.

4.8. Denitrificatie in een opwaarts doorstroomd bed

Het effect op de emissie van nitraat is moeilijk in te schatten. Een heterotroof denitrificerend systeem, heeft een externe C-bron nodig. Een bed bestaande uit zwavel/kalksteen is een mogelijke optie. De toepassingsmogelijkheden van dit proces in depots moet nader worden onderzocht.

*Onderzoek naar recirculatie en in-situ reiniging
van retourwater van grootschalige speciedepots*

Tabel 19: Overzicht van de toetsing van de in-situ mogelijkheden.

	effecten op de emissie	inpasbaarheid in depot ontwerp	globale kosten	samenhang met nageschakelde zuive- ringstechnieken	Beheer	leemten in kennis
een of meerdere afgescheiden aflatzones	+	+	+ / 0	+	+	ja
buffering in het depot	+	+	+	+	+	ja
helofytenvelden	- / +	- / +	+	+	+	ja
nitrificatie op dragermateriaal	+	+	0	+	0 / +	zeer veel
nitrificatie met "fill-and-draw" systeem	0 / -	+	0 / -	+	0	veel
nitrificatie in opwaarts doorstroomd bed	+	+	0 / -	+	0	zeer veel
denitrificatie in opwaarts doorstroomd bed	0 / ?	?	?	?	+	zeer veel

+ = gunstig; 0 = matig, - = ongunstig ? = onbekend.

5. RECIRCULATIE VAN HET RETOURWATER

5.1. Mogelijkheden tot recirculatie van retourwater

Voor het lossen van de baggerspecie in depot bestaan in principe verschillende mogelijkheden:

- lossen m.b.v. onderlossers (niet toegestaan voor eilanddepots);
- overslag met een kraan
- in het depot persen.

Aanlevering van specie met een zo hoog mogelijke dichtheid leidt tot de laagste retourwaterproductie. Voor grootschalige baggerdepots is in het depot persen van de specie uit kostenooipunt de meest aantrekkelijke variant. Hiertoe bestaan twee mogelijkheden:

- vanuit bakkenzuigers die aangemeerd zijn in een haven bij het depot;
- door baggerzuigers die via een persleiding de specie in het depot pompen.

Bij het lossen van baggerspecie wordt veelal water aan de specie toegevoegd om het mengsel verpompbaar te maken, het zogenaamde "jet-water". In de modelberekeningen is als gemiddelde $1,15 \text{ m}^3 \text{ jetwater/m}^3 \text{ in-situ specie}$ aangehouden. Afhankelijk van de soort specie en de mate van verdichting kan deze factor 3 tot 7 bedragen. Voor het benodigde jet-water kan depotwater gebruikt worden (recirculatie). Het water wordt betrokken van de laag water die boven de specie staat in het depot.

Indien het jetwater uit depot wordt onttrokken is een tweede leiding nodig waarin het jetwater vanuit het depot naar de losplaats wordt getransporteerd. Dit is technisch mogelijk en voor bakkenzuigers het gemakkelijkst te realiseren.

Geconcludeerd kan worden dat het in principe technisch gezien mogelijk is om, zowel bij bagger- als bij bakkenzuigers, recirculatie toe te passen.

In bijlage 4 zijn de resultaten van de berekeningen uitgebreid weergegeven. In dit hoofdstuk wordt volstaan met de hoofdpunten.

De volgende scenario's zijn doorgerekend, conform de methode uit lit 1.:

Tabel 20: Scenario's voor recirculatieberekeningen.

scenario	onderwaterfase	tussenwaterfase	bovenwaterfase
0	GR	GR	GR
1	R	R	R
2	GR	R	R
3	GR	GR	R
4	GR	R	GR

R = recirculatie; GR = geen recirculatie

Recirculatie heeft geen invloed op het z.s.-gehalte in het depotwater. Onderstaand wordt ingegaan op de effecten van recirculatie op:

- retourwaterdebiet;
- $\text{NH}_4\text{-N}$ - en $\text{NO}_3\text{-N}$ -gehalte;
- opgeloste zware metalen en microverontreinigingen;
- fosfaat.

5.2. Effect van recirculatie op het retourwaterdebiet

In figuur 8 is het benodigde jetwater en retourwaterdebiet zonder recirculatie afgebeeld. Na ongeveer 8.5 jaar is meer jetwater nodig dan het te lozen retourwater. Dit betekent dat bij recirculatie de lozing uit het depot nul is (nullozing). Om de waterschijfdikte op één meter te houden, moet zelfs extra water worden toegevoegd.

In tabel 21 is de retourwaterproduktie per scenario weergegeven in de onder-, tussen- en bovenwaterfase. Hieruit blijkt dat ruim 60% reductie van de retourwaterlozing wordt gerealiseerd als recirculatie tijdens de gehele vulperiode wordt toegepast. Het effect van recirculatie is in de onderwaterfase, waarin de meeste specie wordt geborgen, het grootst (en reductie van 13,1 miljoen m^3). In de tussen- en bovenwaterfase is reductie vergelijkbaar (5,3 resp. 7,1 miljoen m^3). In bijlage 4 zijn de cumulatieve retourwaterdebieten weergegeven. De aangegeven reducties zijn sterk afhankelijk van het vulregime van het depot.

Tabel 21: Retourwaterproduktie (in miljoenen m^3) in de verschillende fasen en de reductie t.o.v scenario 0 (in procenten).

scenario	onderwaterfase	tussenwaterfase	bovenwaterfase	totaal
0 (GR GR GR)	23,5	8,1	7,1	38,6
1 (R R R)	11,4 (-51%)	2,8 (-65%)	0 (-100%)	14,3 (-63%)
2 (GR R R)	23,5	2,8 (-65%)	0 (-100%)	26,4 (-32%)
3 (GR GR R)	23,5	8,1	0 (-100%)	31,6 (-18%)
4 (GR R GR)	23,5	2,8 (-65%)	7,1	33,4 (-13%)

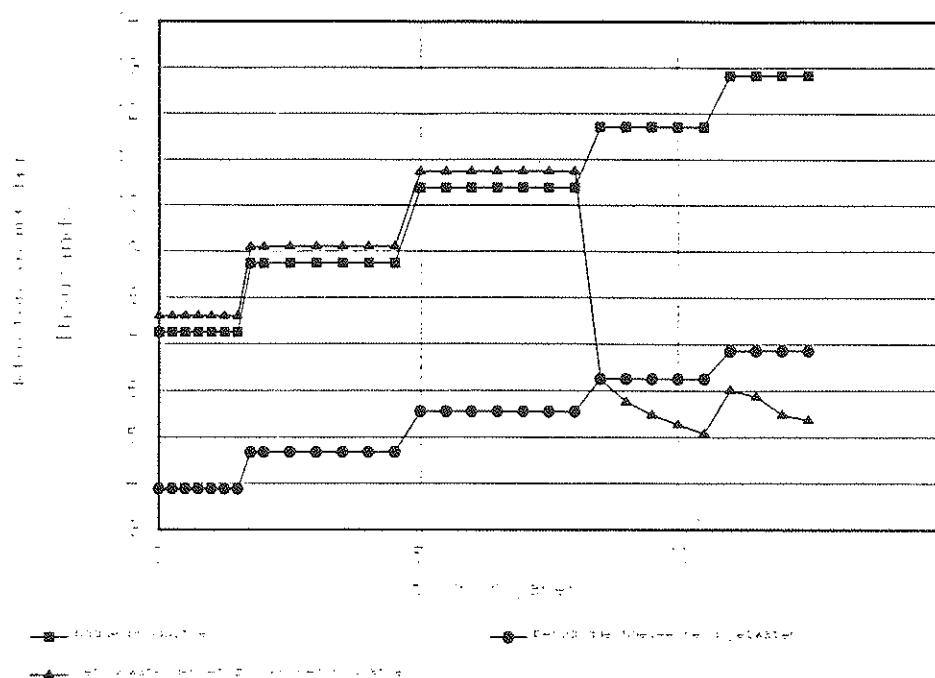
Indien in praktijk de benodigde hoeveelheid jetwater per m^3 situ-specie groter is, dan worden zonder recirculatie de retourwaterdebieten aanzienlijk hoger. Met recirculatie wordt de retourwaterproduktie verlaagd als aangegeven in tabel 21. De procentuele reductie is in dat geval dus aanzienlijk groter.

5.3. Effect van recirculatie op ammonium en nitraat in het retourwater

Figuren 9 en 10 geven voor scenario's 0 en 1 het concentratieverloop van $\text{NO}_3\text{-N}$ en $\text{NH}_4\text{-N}$ in de waterfase tijdens de vulfase. In de onderwaterfase heeft recirculatie nauwelijks effect op het $\text{NO}_3\text{-N}$ -gehalte. Vanaf de tussenwaterfase stijgt het $\text{NO}_3\text{-N}$ -gehalte sterker als recirculatie wordt toegepast, tot maximaal een factor 4 aan het einde van de vulfase.

Het $\text{NH}_4\text{-N}$ -gehalte wordt nauwelijks beïnvloed door recirculatie. In de N-huishouding is de denitrificatie blijkbaar de snelheidsbepalende stap, waardoor het gevormde ammonium relatief snel wordt genitrificeerd, en zich ophoopt als nitraat in het depotwater. Het concentratieverloop van $\text{NO}_3\text{-N}$ voor de overige scenario's is in bijlage 4 opgenomen.

De reducties van emissie van de N-vrachten zijn in tabel 23 weergegeven. Met recirculatie tijdens de gehele vulfase, wordt geloosde $\text{NH}_4\text{-N}$ -vracht gereduceerd tot slechts 17% van de $\text{NH}_4\text{-N}$ -vracht



Figuur 8: De baggerproductie (in-situ-specie), retourwaterproductie bij scenario 0 en de benodigde hoeveelheid jetwater.

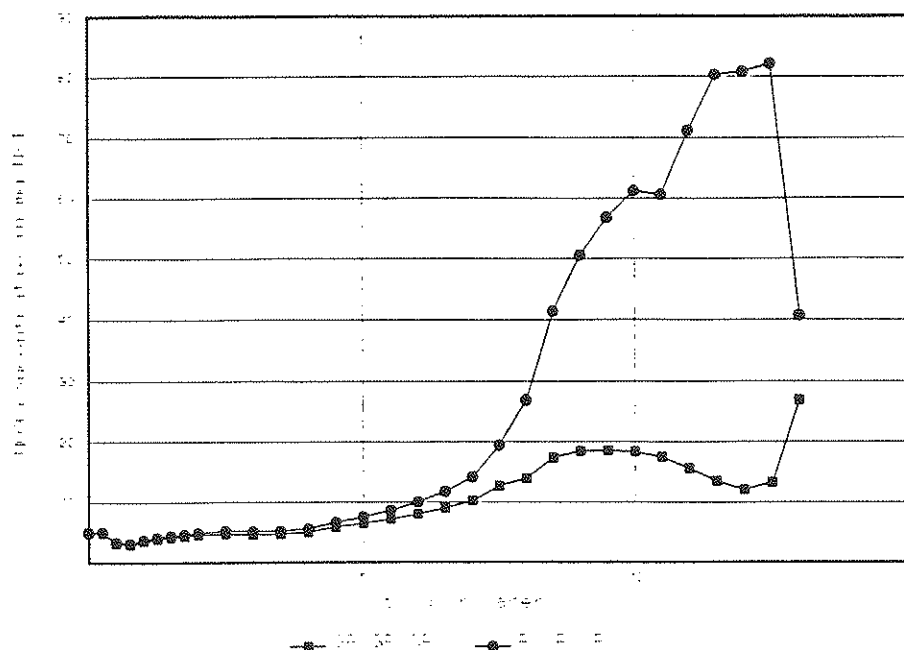
zonder recirculatie. De $\text{NH}_4\text{-N}$ -vrachtreductie is het grootst bij recirculatie in de bovenwaterfase (53%). Recirculatie in de tussenwaterfase (scenario 2) voegt hier nog bijna 25% aan toe. In de onderwaterfase wordt slechts een extra reductie bereikt van circa 8% op het totaal.

Voor Nitraat-N is de totale vrachtreductie door recirculatie 63%, en is het grootst in de bovenwaterfase, meer dan 30%; in de tussenwaterfase (scenario 2) is de reductie 15%. In de onderwaterfase wordt slechts een extra reductie bereikt van circa 15% op het totaal.

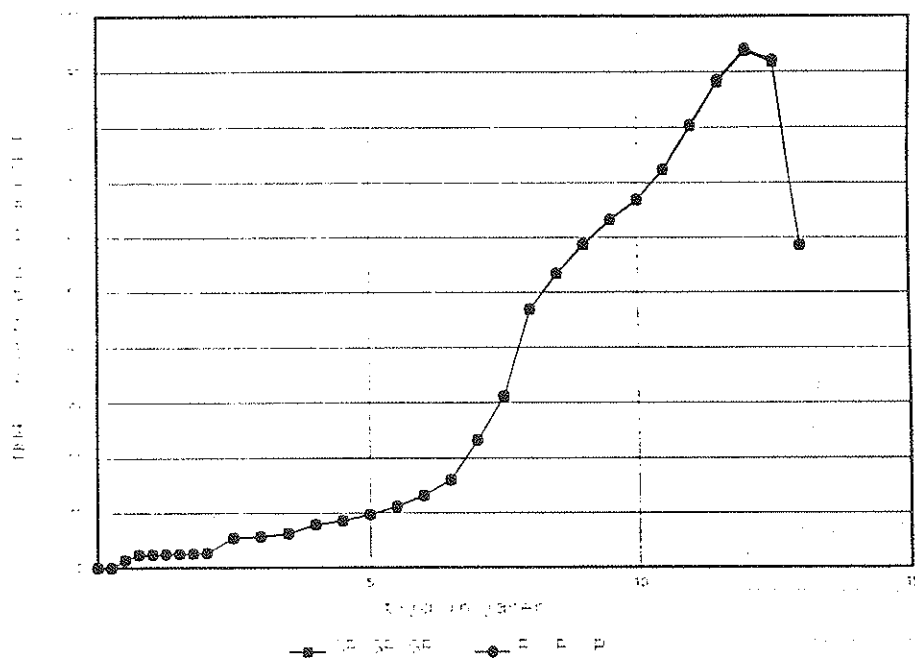
Door de hogere $\text{NH}_4\text{-}$ en $\text{NO}_3\text{-N}$ -gehalten zijn in de tussen- en bovenwaterfase de grootste N-vrachtreducties te behalen. Voor nitraat zijn de reducties geringer door de hogere concentraties in de laatste twee fasen ten opzichte van de $\text{NH}_4\text{-N}$ -gehalten.

Tabel 23: Reductie N-vrachten in de verschillende depotfasen in procenten door recirculatie.

	Ammonium-N	Nitraat-N
onderwaterfase	8	16
tussenwaterfase	22	16
bovenwaterfase	53	31
totaal	83	63



Figuur 9: Concentratie Nitraat-N voor scenario's 0 en 1.



Figuur 10: De $\text{NH}_4\text{-N}$ -concentratie bij scenario's 0 en 1.

5.4. Effect van recirculatie op opgeloste zware metalen en organische microverontreinigingen.

De concentraties van opgeloste zware metalen en organische microverontreinigingen in het

retourwater veranderen niet of nauwelijks door recirculatie (zie de figuren in bijlage 4). Dit komt omdat een groot deel van deze verontreinigingen gebonden is aan z.s.. Recirculatie heeft geen invloed op het z.s.-gehalte in het retourwater.

Alleen PCB 153 geeft tijdens de onderwaterfase een zeer lichte verhoging onder invloed van de concentratie in oplossing.

De geloosde vrachten nemen wel af, omdat door recirculatie het retourwaterdebiet afneemt bij gelijkblijvende concentraties aan microverontreinigingen. In tabel 24 zijn de reductiepercentages voor de zware metalen en organische microverontreinigingen opgenomen. Deze zijn bepaald met de scenario-berekeningen in bijlage 4.

Tabel 24: Reductie van de vrachten aan opgeloste microverontreinigingen door recirculatie in de verschillende depotfasen in % t.o.v. de totaal-vracht zonder recirculatie.

	Cadmium	PCB 153	B(a)P
onderwaterfase	10%	25%	27%
tussenwaterfase	25%	17%	16%
bovenwaterfase	45%	25%	24%
totaal	80%	67%	67%

De reductie van de vrachten aan microverontreinigingen door recirculatie bedragen dus 70 à 80%. De reductie van Cd is het grootst, omdat deze component het best oplosbaar is in water.

Het is opvallend dat de reductie van de emissie van de organische microverontreinigingen ook in de onderwaterfase significant zijn.

5.5. Effect van recirculatie op fosfaat.

Omdat het gedrag van fosfaat wezenlijk verschilt van de overige beschouwde stoffen is het niet zonder meer mogelijk een quantitative inschatting van de reductie van de fosfaatvracht te geven. Gezien de 60%-reductie van het retourwaterdebiet is het aannemelijk dat de fosfaatvracht met enkele tientallen procenten gereduceerd wordt.

6. LEEMTEN IN KENNIS EN SEMI-PRAKTIJKONDERZOEK

6.1. Leemten in kennis

In deze paragraaf wordt een resumé gegeven van de reeds genoemde leemten in kennis. Voor leemten in kennis die specifiek zijn voor de zuiveringstechnieken worden niet weergegeven, hiervoor wordt verwezen naar de betreffende paragraaf.

- de in praktijk optredende gehalten aan z.s., $\text{NH}_4\text{-N}$ en $\text{NO}_3\text{-N}$, BZV en CZV in het retourwater;
- de natuurlijke nitrificatie- en denitrificatiesnelheden in het depot;
- de watertemperatuur in het depot in de verschillende perioden van de vulfase;
- bezinkeigenschappen van het z.s. in het retourwater;
- de invloed van de wind bij het aflaatpunt;
- de invloed van de bufferhoogte in het depot op de inzijging;
- remmende factoren voor nitrificatie in het depot, eutrofiëring en toxische stoffen;
- de korrelgrootteverdeling en de bezinkeigenschappen van het z.s. in het retourwater;
- het organisch koolstofgehalte van de specie, en de biobeschikbaarheid daarvan voor de denitrificatie;
- de mogelijke nitrificatiesnelheden in de in-situ nitrificerende systemen, afhankelijk van o.a. systeem, configuratie, concentratie beluchting, temperatuur;
- de mogelijke denitrificatiesnelheden van in-situ denitrificerende systemen; afhankelijk van beschikbaarheid van een C-bron, pakkethoogte en samenstelling;
- de hoeveelheid jet-water per m^3 situ-specie.

6.2. Algemene onderzoeksaspecten

In het kader van nader onderzoek is het allereerst van belang dat op een voorbeeld-lokatie wordt signaleerd welke emissies optreden, door een goede monitoring van het retourwater betreffende:

- z.s., BZV, CZV, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, en microverontreinigingen (zie ook par 6.1).
Hiermee wordt de leemte in kennis opgevuld betreffende de samenstelling van het retourwater.
- Als een stijgende trend tot boven de gestelde lozingseisen wordt waargenomen, wordt nader onderzoek verricht, namelijk:
 - voorbereidend laboratorium-onderzoek;
 - en vervolgens semi-praktijkonderzoek.

Gezien de leemten in kennis moet het onderzoek zich richten op z.s.-verwijdering en N-verwijdering.

6.3. Recirculatie

Onderzoek naar recirculatie kan zich richten op de techniek van recirculatie bij de verschillende baggermethodieken. Voorts is onderzoek naar baggertechnieken, waarmee de situ-specie met een zo hoog mogelijke dichtheid wordt gebaggerd van belang voor de reductie van het te lozen retourwaterdebiet en de daarmee gepaard gaande emissie naar het oppervlaktewater.

De invloed van recirculatie op de emissie uit het depot is slechts nader te onderzoeken in bestaande depots, door eventueel voorhanden zijnde gegevens nader te analyseren. Semi-praktijkonderzoek

heeft weinig zin. De langzame processen die daarbij een rol spelen (het uitpersen van poriewater naar de waterschijf) zijn moeilijk op kleine schaal na te bootsen.

6.4. Zwevende-stofverwijdering

Bij z.s.-verwijdering zijn vooral de in praktijk optredende fluctuaties in z.s.-gehalten belangrijk, afhankelijk van windinvloeden en waterschijfdikte. Deze kunnen op een voorbeeldlokatie eenvoudig worden bepaald door registratie van het z.s.-gehalte in het retourwater en op verschillende punten in het depot, de windsterkte en -richting en de waterschijfdikte. Voor buffering in het depot kan op grond van deze gegevens worden bepaald hoe lang, en met welke frequentie gebufferd moet worden. Afhankelijk van de aanvoer van de specie kan worden bepaald welke waterhoogte voor buffering in het depot gereserveerd moet worden, en welke overschrijdingsfrequentie daarbij hoort.

Voorts zijn de eigenschappen van het z.s. van belang. Bij verschillende z.s. gehalten in het retourwater kunnen in het laboratorium worden bepaald:

- de korrelgrootteverdeling
- de bezinkbaarheid en soortelijke massa van het totaal z.s. en de fracties
- de verontreinigingsgraad van de fracties.
- de invloed van dosering van verschillende soorten poly-electrolyt op de bezinking.

Op grond van deze informatie kan worden bepaald:

- een grove schatting van de oppervlaktebelasting (debiet per m² bezinkoppervlakte);
- wat de invloed is van verschillende z.s. gehalten op het rendement
- welke fractie met het effluent wordt afgevoerd, en welke vervuilingsgraad deze bezit.
- hoe het bezinkrendement kan worden verhoogd door toevoeging van poly-electrolyt, welke soort PE en dosering optimaal is. Op grond hiervan kan tevens de milieubezwaarlijkheid van PE-dosering worden ingeschat.
- de optimale lokatie(s) van de aflatzone(s).

Op grond van bovengenoemde informatie kan semi-praktijkonderzoek worden uitgevoerd in een klein bezinkbassin, waarbij de volgende parameters gevarieerd kunnen worden:

- 1) de oppervlaktebelasting, zodat de oppervlakte van de afgescheiden zone in het depot kan worden bepaald;
- 2) eventuele PE-dosering.

Op grond van metingen kan het rendement worden vastgesteld, en de aard van het z.s. dat wordt geloosd.

Het bovengenoemd onderzoek kan naar verwachting binnen een half jaar worden uitgevoerd.

6.5. Nitrificatie

Onderzoek van nitrificatie in het depot dient zich te richten op de toepassing van slib-op-dragersystemen en een opwaarts doorstroomd bed (in feite ook een slib-op-dragersysteem). Onderzoek moet gericht zijn op:

- bepaling van de zandbeddikte en doorstroomsnelheid bij een opwaarts doorstroomd bed;
- selectie van het soort dragermateriaal;
- beluchting: hierbij is vooral de keuze van belang tussen geforceerde beluchting, of gebruik van zuurstof in het water in combinatie met hogere doorstroomdebieten;

- optimalisering en bepaling van de nitrificatiesnelheid, als belangrijke ontwerpparameter;
- het vaststellen van de stabiliteit van het systeem.

Vorbereidend laboratorium-onderzoek ligt hier minder voor de hand: doorgaans zijn de dragermaterialen in geprefabriceerde pakketten te koop. Onderzoek moet dus aan één pakket worden uitgevoerd in een semi-praktijk-opstelling. Gezien de lange adaptatietijd van slib-op-dragersystemen (circa 4 weken) is het wenselijk simultaan meerdere proeven met verschillende dragermaterialen, uit te voeren.

Het onderzoek kan uit de volgende fasen bestaan:

- 1) geforceerde beluchting en een laag doorstroomdebiet, en stapsgewijze verhoging van debiet;
- 2) geen extra beluchting bij hoger debiet, stapsgewijze variatie van het debiet;
- 3) variatie van het ammoniumgehalte door toevoeging van ammonium;
- 4) duurproef met de optimale configuratie die volgt uit 1) tot en met 3).

Bepaald worden:

- ammoniumgehalte in het influent en effluent, waarmee de omzettingssnelheid per m³ dragermateriaal kan worden bepaald;
- zuurstofgehalte in het influent en effluent;
- aangroei op het dragermateriaal (visueel, microscopisch).

Het tijdsbestek waarin het onderzoek kan worden uitgevoerd wordt geschat op 3/4 tot 1 jaar.

6.6. Denitrificatie

Vorbereidend onderzoek zou kunnen bestaan uit proeven aan specie aan de vorming van koolstof dat voor de denitrificatie kan worden benut. Dit kan geschieden door in een anaeroob milieu verzuringsreacties uit te voeren aan verschillende speciesoorten. Met vetzuur- en TOC-bepalingen aan een gefiltreerd monster kan de C-productie worden bepaald. Deze proeven geven slechts een indicatie van de maximale hoeveelheid koolstof, die uit specie kan worden verkregen.

Voorts kunnen denitrificatieproeven worden uitgevoerd, door in het laboratorium aan specie nitraatrijk water toe te voegen, en periodiek de nitraatconcentratie te meten.

In lit 7 zijn reeds denitrificatiesnelheden bepaald in specie van een waterbodem. De conclusie was, dat door gebrek aan koolstof de denitrificatiesnelheden in de waterbodem relatief laag zijn. De snelheden zijn echter specie-afhankelijk; bovendien speelt de bedhoogte die wordt doorstroomd een rol. Ook het zwavel-kalksteenproces kan eerst op laboratoriumschaal worden uitgevoerd, om te bekijken of het proces geschikt is voor reiniging depotwater.

Toepassing van een opwaarts doorstroomd zand- of zwavel-kalksteenpakket in twee straten kan op semi-praktijkschool worden getest. Het onderzoek kan worden uitgevoerd in de volgende fasen.

- variatie van het doorstroomdebiet;
- variatie van slibgehalte of toevoeging van een organische fractie (bij zandbed);
- duurproef van de optimale configuratie, zodat de stabiliteit van het systeem kan worden bepaald.

Bepaald worden:

- de ingaande en uitgaande nitraat-concentratie;
- het organische stofgehalte van het zandbed.

Op deze wijze kan de denitrificatiesnelheid per m³ zand- of zwavel-kalksteenpakket worden bepaald, en de benodigde organische fractie.

7. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

7.1. Algemeen

De resultaten van de Werkgroep Referentie Ontwerp vormen een belangrijke basis voor deze studie. Debieten en concentraties van de verontreinigingen zijn modelmatig ingeschat. In het model zijn slechts de hoofdprocessen opgenomen die zich in het depot kunnen afspelen. Voorts zijn globale aannamen gemaakt in het model en bij de keuze van de invoergegevens. In dit stadium is het model slechts geschikt om trends aan te geven.

Deze trends zijn zeer nuttig om globaal de effectiviteit van maatregelen te beoordelen. Het is in dit stadium echter niet mogelijk om betrouwbare voorspellingen te doen over in praktijk optredende gehalten. Hiertoe zou het model verder moeten worden verfijnd, en de ingangsgegevens nauwkeuriger moeten worden vastgesteld, eventueel op basis van semi-praktijkonderzoek. Voorts zou het model gevalideerd kunnen worden door bij een voorbeeld-lokatie een uitgebreid meetprogramma uit te voeren.

Monitoring en registratie van de belangrijkste milieubezwarelijke stoffen in het retourwater tijdens de vulfase is van groot belang. Bovendien past monitoring in het kader van de IBC-criteria. Het geeft inzicht in het patroon van de concentraties in de tijd. Met deze gegevens kan worden vastgesteld of, en wanneer emissiereducerende maatregelen operationeel moeten zijn.

Hierbij zijn vooral gehalten aan z.s. en stikstofverbindingen van belang, die bijvoorbeeld in debietproportionele etmaalmonsters van het retourwater kunnen worden bepaald. Microverontreinigingen kunnen op grond van periodieke steekmonsters worden vastgesteld.

Een grote emissiereductie wordt bereikt als de niveaustijging in het depot optreedt in de bovenwaterfase, waarin het depotwater de hoogste concentratie aan verontreinigingen bevat. Door de niveaustijging wordt het lozingsdebiet sterk gereduceerd (zelfs tot een nullozing) in een periode waarin de concentraties van verontreinigingen het grootst zijn.

7.2. Zwevende-stofverwijdering

Voor het terughouden van z.s. in het depot zijn twee maatregelen kansrijk, namelijk één of meerdere afgescheiden aflaatzones en buffering in het depot. Met beide maatregelen wordt de invloed beperkt van de wind op het z.s.-gehalte in het depotwater. Buffering in het depot komt als eerste maatregel in aanmerking, omdat hiervoor weinig extra voorzieningen nodig zijn, en het uit kosten oogpunt gunstig is.

Afscheiding van een of meerdere aflaatpunten kan ertoe leiden dat het aantal gevallen wordt beperkt waarin de buffering volledig is benut, en retourwater met een verhoogd z.s.-gehalte moet worden geloosd. Gezien de vrij hoge investeringen, vooral door het leidingwerk, ligt een tweede aflaatpunt minder voor de hand.

Helofytenvelden zijn slechts geschikt voor de consolidatiefase. Zij kunnen onderdeel uitmaken van een ecologisch plan voor het depot in de consolidatiefase, waarbij wordt gestreefd naar een gezond ecosysteem in het depot. Dit vormt een apart onderwerp van studie.

Met de bovengenoemde maatregelen wordt de goed tot redelijk bezinkbare fractie van het z.s. in het depot terughouden. Mocht (incidenteel) een nageschakelde techniek nodig zijn, dan moet de

nageschakelde techniek geschikt zijn om juist de fijne z.s.-fractie ($< 0,063$ mm) te verwijderen. Aanvullende bezinking, zonder toevoeging van chemicaliën heeft geen effect. Meer voor de hand liggende technieken zijn flocculatie en (zand)filtratie.

7.3. N-verwijdering

Uit theoretische berekeningen blijkt dat de nitrificatie waarschijnlijk niet de beperkende stap vormt in de stikstofhuishouding in het depot. De beperkende stap is de denitrificatie, waarschijnlijk door de beperkte beschikbaarheid van een natuurlijke C-bron. Dit houdt in dat stikstof in het depot voornamelijk in de vorm van $\text{NO}_3\text{-N}$ aanwezig zal zijn, en dat de concentratie $\text{NH}_4\text{-N}$ laag blijft. Recirculatie leidt tot hogere nitraatgehalten, en tot een reductie van de geloosde nitraatvracht, door een sterkere verlaging van het te lozen retourwaterdebiet.

Of in praktijk aanvullende nitrificatie nodig is, moet blijken uit monitoring van het ammoniumgehalte in het retourwater. Mogelijk treedt dit in de tussen- en bovenwaterfase op. Mocht de retourwaterproductie in de bovenwaterfase door recirculatie tot nul worden gereduceerd, dan zijn aanvullende maatregelen slechts nodig voor de tussenwaterfase.

Een in-situ nitrificerend systeem moet in staat zijn om een bepaalde vracht te nitrificeren. Fluctuaties in zuiveringsrendement zijn niet zo relevant, omdat deze worden uitgedempt door de lange hydraulische verblijftijd in het depot. Ten opzichte van nageschakelde technieken behoeven dus veel minder strenge eisen te worden gesteld aan de uitvoering en sturing, zodat het systeem vaak eenvoudiger kan worden uitgevoerd dan vergelijkbare nageschakelde technieken. Het beheer van de installatie is tevens eenvoudiger.

Gezien het grote aantal leemten in kennis is het in dit stadium niet mogelijk om reeds een selectie te maken tussen de uitgewerkte systemen. Nitrificatie op dragermateriaal in het depot lijkt een kansrijke maatregel, wegens de mogelijk eenvoudige uitvoering en gering onderhoud. Het fill-and-draw-systeem vergt relatief veel voorzieningen.

In principe kan een nitrificerend systeem in het depot nageschakelde zuiveringstechnieken vervangen. Semi-praktijkonderzoek moet echter uitwijzen in hoeverre de maatregelen technisch haalbaar zijn, en welke omzettingssnelheden gehaald kunnen worden.

In situ heterotrofe denitrificatie is slechts met uitgebreide maatregelen te bevorderen. Bijvoorbeeld: circulatie van nitraatrijk water via een uitgebreid drainagesysteem door een zandpakket, waaraan een organische fractie is toegevoegd. Toepassing van het zwavel-kalksteenproces is een aantrekkelijke optie. Gezien het groot aantal leemten in kennis, is het op dit moment niet mogelijk om de effectiviteit van aanvullende denitrificatie in het depot vast te stellen.

7.4. Recirculatie

Recirculatie leidt, vooral in de tussen- en bovenwaterfase, tot een aanzienlijke reductie van de retourwaterdebiet, en van de emissie van ammonium en nitraat. In de bovenwaterfase kan met recirculatie zelfs de retourwaterproductie tot nul worden gereduceerd, door de niveaustijging in het depot. Dit betekent dat in deze fase geen emissiereducerende maatregelen nodig zijn.

Bij een ander depot-ontwerp, waarin een geringere, of geen niveaustijging tijdens het vullen is opgenomen, komt in de bovenwaterfase wel retourwater vrij. In dat geval zijn emissiereducerende maatregelen relevant.

Met recirculatie kan het totale retourwaterdebiet met meer dan 60% worden gereduceerd waarvan 30% in de onderwaterfase en 15% in de tussen- respectievelijk bovenwaterfase.

Het $\text{NH}_4\text{-N}$ -gehalte wordt waarschijnlijk niet beïnvloed door recirculatie.

Omdat de $\text{NH}_4\text{-N}$ -concentratie met name in de bovenwaterfase sterk oploopt, wordt in deze fase de grootste vrachtreductie bereikt door recirculatie van retourwater (verlaging van het debiet). Bij volledige recirculatie kan een vrachtreductie van meer dan 80% bereikt.

De $\text{NO}_3\text{-N}$ -concentratie neemt door recirculatie toe. Deze toename kan met de gegeven uitgangspunten en randvoorwaarden een factor vier bedragen aan het einde van de vulfase. Hierdoor is de vrachtreductie aan $\text{NO}_3\text{-N}$ minder dan $\text{NH}_4\text{-N}$. Bij volledige recirculatie wordt een vrachtreductie bereikt van meer dan 60% waarvan 30% in de bovenwaterfase. In dit opzicht sorteert recirculatie in de bovenwaterfase het meeste effect.

De concentraties van de opgeloste zware metalen en de organische microverontreinigingen worden niet beïnvloedt door recirculatie. De geloosde vrachten worden verlaagd, omdat door recirculatie het lozingsdebiet afneemt.

Het gedrag van fosfaat in het water van speciedepots is relatief nog onbekend, zodat het niet mogelijk is om kwantitatieve uitspraken te doen voor fosfaat. Het is echter aannemelijk gezien de grote reductie van alleen al het retourwaterdebiet dat ook voor fosfaat aanzienlijke vrachtreducties mogelijk zullen zijn.

7.5. Aanbevelingen

Aanbevolen wordt om de processen die een rol spelen bij de verontreinigingsgraad van het depotwater meer gedetailleerd in kaart te brengen, en op basis daarvan het model dat gebruikt is door de WRO verder te verfijnen. Belangrijke invoergegevens die een grote invloed hebben op de uitkomsten, zoals nitrificatie- en denitrificatiesnelheden, dienen op grond van nader onderzoek nauwkeuriger te worden bepaald. Op basis van gegevens van een depot dat wordt gemonitord, kan het model worden gevalideerd.

Helofytenvelden zijn zeer goed toepasbaar in de consolidatiefase. Aanbevolen wordt om voor de consolidatiefase een studie uit te voeren naar de ontwikkeling van een ecosysteem in het depot waardoor een natuurlijk milieu ontstaat in het depot, en de emissie uit het depot in de consolidatiefase wordt beperkt.

Op grond van de berekeningen blijkt recirculatie in alle depotfasen effectief. De kosten van het recirculeren in de verschillende perioden kunnen echter variëren. Het is aan te bevelen een kostenevaluatie voor de recirculatie berekeningen uit te voeren.

Bij de berekeningen is aangenomen dat 1.15 m^3 jetwater per situ m^3 specie nodig is om de specie in het depot te brengen. In de praktijk kan deze hoeveelheid aanzienlijk groter zijn. Hierdoor zullen mogelijk afwijkende resultaten worden verkregen. Nader onderzoek naar dit effect lijkt wenselijk.

Omdat de reductiepercentages depotaafhankelijk zijn, en niet direct naar elk depotontwerp zijn te vertalen, lijkt een gevoeligheidsanalyse met variërende depotdimensies, vulstrategieën en baggerwijken zinvol.

LIJST MET BEGRIPPEN EN AFKORTINGEN

Afkortingen

BaP	Benzo(a)pyreen
BZV	biologisch zuurstofverbruik in 5 dagen bij 20 °C
C _{NH4-N}	ammonium-N-concentratie
CZV	chemisch zuurstofverbruik
IBC	Isoleren, beheersen en controleren
GFT	groente- fruit- en tuinafval
N	stikstof
N-Kj	stikstofverbindingen bepaald volgens de Kjeldahl methode (o.a. ammoni- um en ureum)
NO ₃ -N	nitraat-stikstof
OC	Oxygenation Capacity
P	fosfor
PAK	polyaromatische koolwaterstoffen
PCB	polychloorbifenylen
PE	poly-electrolyt voor een verbeterde z.s.-afscheiding
PSD	Projectgroep Speciedepots
Q _{retourwater}	retourwaterdebiet
RO	Referentie Ontwerp
RWZI	rioolwaterzuiveringsinstallatie
WRO	Werkgroep referentie-ontwerp
WVO	Wet Verontreiniging Oppervlaktewateren

Begrippen

aeroob	situatie met zuurstof
anaeroob	situatie zonder zuurstof en zonder nitraat
anoxisch	situatie zonder zuurstof en met nitraat
autotroof	bacteriën die CO ₂ als koolstofbron gebruiken
bovenwaterfase	periode in de vulfase waarin circa 1 meter water op de specielaag staat
denitrificatie	biologische omzetting van nitraat in stikstofgas (N ₂) door heterotrofe bacteriën
fill-and-draw	biologisch zuiveringsproces met een vulfase, reactiefase, bezinkfase en aflaatfase

jet-water	water dat wordt gebruikt om de aangevoerde specie verpompaar te maken bij het inbrengen van de specie in het depot
heterotroof	bacteriën die organische koolstofverbindingen als koolstofbron gebruiken
nitrificatie	biologische omzetting van N-Kj-verbindingen in nitraat door autotrofe bacteriën
onderwaterfase	periode in de vulfase waarbij het specieniveau reikt tot 5 meter onder de waterspiegel
oppervlaktebelasting	het debiet dat per m ² oppervlak aan een systeem wordt toegevoerd uitgedrukt in m ³ /m ² /h
retourwater	water dat uit het depot moet worden geloosd
situ-specie	de specie direct na het opbaggeren
tussenwaterfase	periode in de vulfase waarbij het specieniveau van 5 meter tot 1 meter onder de waterspiegel
zwevende stof	de fractie van onopgeloste deeltjes die achterblijft na droging bij een temperatuur van 100°C

LITERATUURLIJST

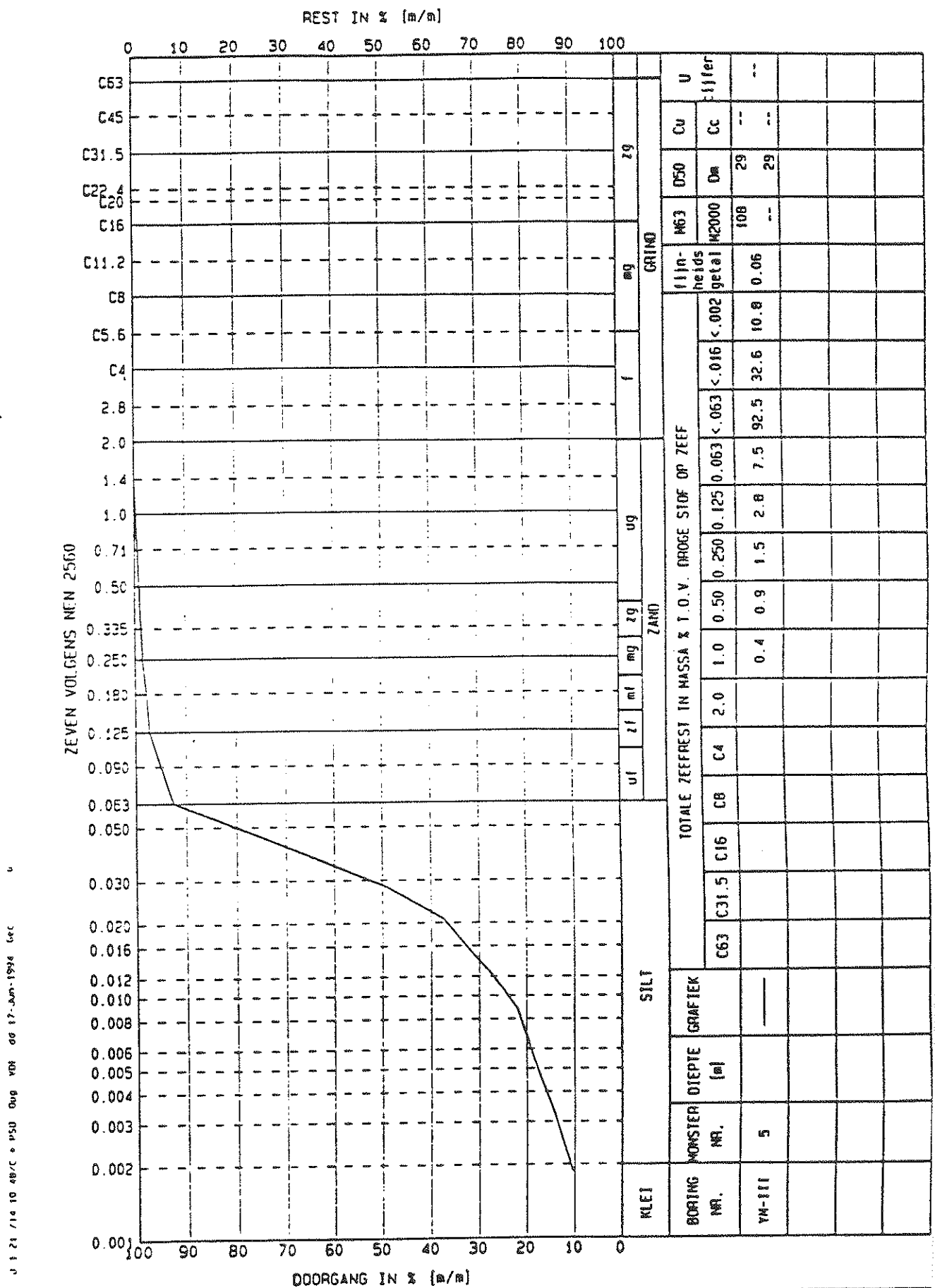
- 1 Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat Bouwdienst Rijkswaterstaat Hoofdafdeling Waterbouw "Ontwerpaspecten Speciedepots Resultaten van de tweede fase" Projectgroep Speciedepots Werkgroep Referentie Ontwerp 15 januari 1993 (PSD-N-93002 WR-N-93005).
- 2 Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat Bouwdienst Rijkswaterstaat Hoofdafdeling Waterbouw "Ontwerpaspecten Speciedepots, Deelnota Zuiveringstechnieken" Projectgroep Speciedepots Werkgroep Referentie Ontwerp. Augustus 1993.
- 3 Ministerie van verkeer en waterstaat Rijkswaterstaat RIZA "Beoordeling van de lozing van retourwater uit een baggerspeciedepot". Werkdocument 94.120 X. J. Hartnack 25 augustus 1994.
- 4 Pinnekamp, J. Opitz, M "Restnitrification nach weitergehender Abwasserreinigung". Korrespondenz Abwasser 2 1991 38. Jahrgang. p 247-254.
- 5 Lessel, T. Kopmann, T. "Erfahrungen mit getauchten Festbettreactoren für die Nitrification". Korrespondenz Abwasser 12 1991 38. Jahrgang p 1652-1661.
- 6 Metcalf & Eddy "Wastewater Engineering, treatment, disposal and reuse" Third edition 1991 McGraw-Hill Inc.
- 7 Luin van F, Boers P., Lijklema L., "Comparison of denitrification rates obtained by the N_2 -flux, the ^{15}N isotope pairing technique and the mass balance approach, in press.
- 8 Eikelboom D.H. Bral E.A.M.A, RWZI 2000 "Linpor sponsjes als dragermateriaal bij de aerobe zuivering van rioolwater" 1990, RWZI 2000 90-07 VROM MT 1990/8.
- 9 Meuleman A.F.M. "Waterzuivering door moerassystemen" 1993, RIZA nota 94011.

Bijlage 1: Waterbalans van het depot volgens het Referentie Ontwerp

Bijlage 1 Waterbalans depot afgedekt met waterdicht folie

Tijd (jaren)	Waterpeil (m NAP)	Specieniveau (m NAP)	Neerslag (m ³ /d)	Productie (m ³ /d)	Dijkse Kwel (m ³ /d)	Inzijging (m ³ /d)	Q-op (m ³ /d)	Q-neer (m ³ /d)	Retourwater (m ³ /d)
0	-4,5	-25	354	7262	0	0	0	0	7616
0,25	-4,5	-24,19	354	7262	0	0	0	0	7616
0,5	-4,5	-23,59	354	7262	0	0	2139	0	7616
0,75	-4,5	-23,05	354	7262	0	0	3434	0	7616
1	-4,5	-22,52	354	7262	0	0	3349	0	7616
1,25	-4,5	-21,96	354	7262	0	0	3334	0	7616
1,5	-4,5	-21,4	354	7262	0	0	3323	0	7616
1,75	-4,5	-20,85	354	8748	0	0	3313	0	9102
2	-4,5	-20,29	354	8748	0	0	3305	0	9102
2,5	-4,5	-19,18	354	8748	0	0	3294	0	9102
3	-4,5	-18,04	354	8748	0	0	3284	0	9102
3,5	-4,5	-16,92	354	8748	0	0	3335	0	9102
4	-4,5	-15,8	354	8748	0	0	3919	0	9102
4,5	-4,5	-14,68	354	8748	0	0	3906	0	9102
5	-4,5	-13,55	354	10391	0	0	3901	0	10744
5,5	-4,5	-12,41	354	10391	0	0	3888	0	10744
6	-4,5	-11,28	354	10391	0	0	3880	0	10744
6,5	-4,5	-10,15	354	10391	0	0	3869	0	10744
7	-4,5	-9,01	354	10391	0	0	4503	0	10744
7,5	-4,5	-7,88	354	10391	0	0	4499	0	10744
8	-4,5	-6,71	354	10391	0	0	4490	0	10744
8,5	-4,5	-5,57	354	11705	0	0	4479	0	6239
9	-3,42	-4,42	354	11705	0	0	4459	0	5758
9,5	-2,27	-3,27	354	11705	0	0	4441	0	5483
10	-1,11	-2,11	354	11705	0	0	4416	0	5281
10,5	0,06	-0,94	354	11705	0	0	4859	0	5079
11	1,24	0,24	354	12829	0	0	4858	0	6023
11,5	2,42	1,42	354	12829	0	0	4836	0	5876
12	3,6	2,6	354	12829	0	0	5166	0	5493
12,5	4,81	3,81	354	12829	0	0	5176	0	5376
13	6,01	5,01	354	0	0	0	5144	0	7864
13,5	4,86	4,86	354	0	0	0	1145	0	1340
14	4,7	4,7	354	0	0	0	1020	0	1310
14,5	4,55	4,55	354	0	0	0	939	0	1211
15	4,42	4,42	354	0	0	0	883	0	1209
16	4,15	4,15	354	0	0	0	802	0	1170
17	3,89	3,89	354	0	0	0	744	0	1136
18	3,64	3,64	354	0	0	0	700	0	1100
19	3,41	3,41	354	0	0	0	665	0	1064
20	3,18	3,18	354	0	0	0	636	0	1067
21	2,95	2,95	354	0	0	0	610	0	1044
22	2,73	2,73	354	0	0	0	587	0	1017
23	2,51	2,51	354	0	0	0	567	0	1012
24	2,3	2,3	354	0	0	0	548	0	997
25	2,09	2,09	354	0	0	0	530	0	942
30	1,11	1,11	354	0	0	0	454	0	866
35	0,25	0,25	354	0	0	0	393	0	800
40	-0,52	-0,52	354	0	0	0	343	0	740
45	-1,19	-1,19	354	0	0	0	302	0	696
50	-1,8	-1,8	354	0	0	0	269	0	642
60	-2,83	-2,83	354	0	0	0	216	0	584
70	-3,67	-3,67	354	0	0	0	179	0	545
80	-4,38	-4,38	354	0	0	0	150	0	384
90	-4,5	-4,99	354	0	0	0	127	0	354
100	-4,5	-5,5	354	0	0	0	109	0	354
120	-4,5	-6,35	354	0	0	0	82	0	354
140	-4,5	-6,98	354	0	0	0	66	0	354
160	-4,5	-7,48	354	0	0	0	44	0	354
180	-4,5	-7,87	354	0	0	0	46	0	354
200	-4,5	-8,2	354	0	0	0	28	0	354

Bijlage 2: Zeefkromme van specie uit het Ketelmeer



KORRELVERDELINGSDIAGRAM
Classificatieproeven YM en ZU
materiaal Ketelmeer fase I

CONCEPT

Opdr. H-060
Bijl.

Bijlage 3: Voorbeeld-dimensionering van een fill-and- draw proces.

	waarde	eenheid
slibgehalte in het systeem	4*	kg d.s./m ³
fractie nitrificeerders	10*	%
gemiddelde temperatuur	10	°C
N-Kj gehalte influent	15	mg N/l
zuurstofgehalte in de reactor	2	mg O ₂ /l
veiligheidsfactor	2,5	-
actuele groeisnelheid	0,18	d ⁻¹
k'	0,9	d ⁻¹
minimale slibverblijftijd	7,7	d
actuele slibverblijftijd	19,2	d
N-Kj verbruikfactor	0,51	d-1
hydraulische verblijftijd	4	uur
debiet in tussenwaterfase	500	m ³ /h
volume	2.000	m ³

Voorts moet het volume worden gecorrigeerd voor:

- de vul- bezink- en aflaattijd) +40 %;
- het benodigde volume voor het bezinksel: +30 %

Het benodigde totaal-volume is in dit voorbeeld dus 3.400 m³

Bijlage 4: Resultaten van de recirculatie-berekeningen.

Tabel I: Retourwaterproductie in de verschillende fasen en de reductie t.o.v scenario 0 (GR GR GR).

scenario	vracht in fase 10 ⁶ m ³ (reductiepercentage t.o.v. situatie zonder recirculatie)			
	onderwaterfase	tussenwaterfase	bovenwaterfase	totaal
0 (GR GR GR)	23,5	8,1	7,1	38,6
1 (R R R)	11,4 (51%)	2,8 (65%)	0 (100%)	14,3 (63%)
2 (GR R R)	23,5	2,8 (65%)	0 (100%)	26,4 (32%)
3 (GR GR R)	23,5	8,1	0 (100%)	31,6 (18%)
4 (GR R GR)	23,5	2,8 (65%)	7,1	33,4 (13%)

Tabel II Ammonium-N-vrachten in het retourwater in de verschillende fasen en de reductie t.o.v scenario 0 (GR GR GR)

scenario	vracht in ton N (reductiepercentage t.o.v. situatie zonder recirculatie)			
	onderwaterfase	tussenwaterfase	bovenwaterfase	totaal
0 (GR GR GR)	168	321	561	1.050
1 (R R R)	81 (52%)	96 (70%)	0 (100%)	178 (83%)
2 (GR R R)	168	96 (70%)	0 (100%)	264 (75%)
3 (GR GR R)	168	321	0 (100%)	489 (53%)
4 (GR R GR)	168	96 (70%)	561	825 (21%)

Tabel III Nitraatvrachten in het retourwater in de verschillende fasen en de reductie t.o.v scenario 0 (GR GR GR).

scenario	vracht in ton N (reductiepercentage t.o.v. situatie zonder recirculatie)			
	onderwaterfase	tussenwaterfase	bovenwaterfase	totaal
0 (GR GR GR)	132	111	112	353
1 (R R R)	74 (44%)	57 (49%)	0 (100%)	131 (23%)
2 (GR R R)	132	55 (50%)	0 (100%)	188 (53%)
3 (GR GR R)	132	111	0 (100%)	243 (31%)
4 (GR R GR)	132	56 (50%)	116	304 (14%)

Tabel IV Cadmiumvracht in het retourwater in de verschillende fasen en de reductie t.o.v scenario 0 (GR GR GR)

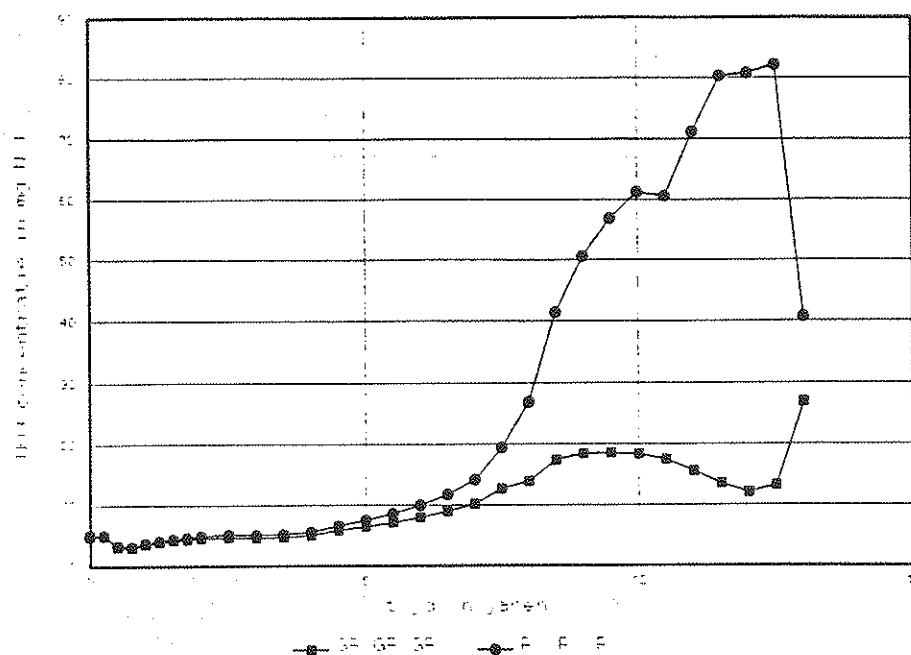
scenario	Cd-vracht in kg (reductiepercentage t.o.v. situatie zonder recirculatie)			
	onderwaterfase	tussenwaterfase	bovenwaterfase	totaal
0 (GR GR GR)	3,0	4,4	6,0	13,4
1 (R R R)	1,5 (50%)	1,2 (73%)	0 (100%)	2,7 (80%)
2 (GR R R)	3,0	1,2 (73%)	0 (100%)	4,2 (69%)
3 (GR GR R)	3,0	4,4	0 (100%)	7,4 (45%)
4 (GR R GR)	3,0	1,2 (73%)	6,0	10,2 (24%)

Tabel V PCB 153-vracht in het retourwater in de verschillende fasen en de reductie t.o.v scenario 0 (GR GR GR)

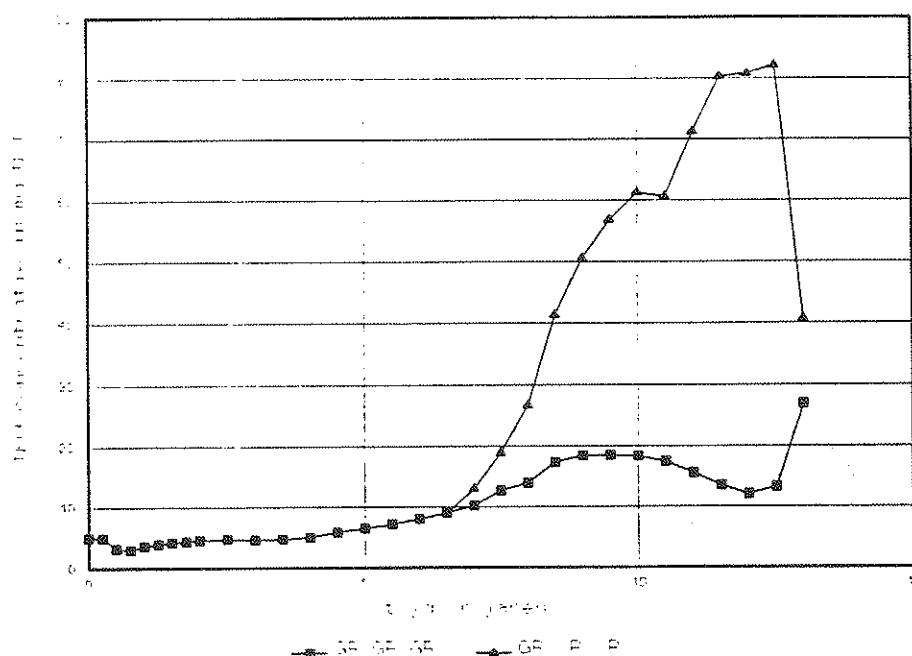
scenario	PCB153-vracht in kg (reductiepercentage t.o.v. situatie zonder recirculatie)			
	onderwaterfase	tussenwaterfase	bovenwaterfase	totaal
0 (GR GR GR)	0,18	0,09	0,09	0,36
1 (R R R)	0,09 (50%)	0,03 (67%)	0 (100%)	0,12 (67%)
2 (GR R R)	0,18	0,03 (67%)	0 (100%)	0,21 (42%)
3 (GR GR R)	0,18	0,09	0 (100%)	0,27 (25%)
4 (GR R GR)	0,18	0,03 (67%)	0,09	0,30 (17%)

Tabel VI B(a)P-vrachten in het retourwater in de verschillende fasen en de procentuele vrachten t.o.v scenario 0 (GR GR GR)

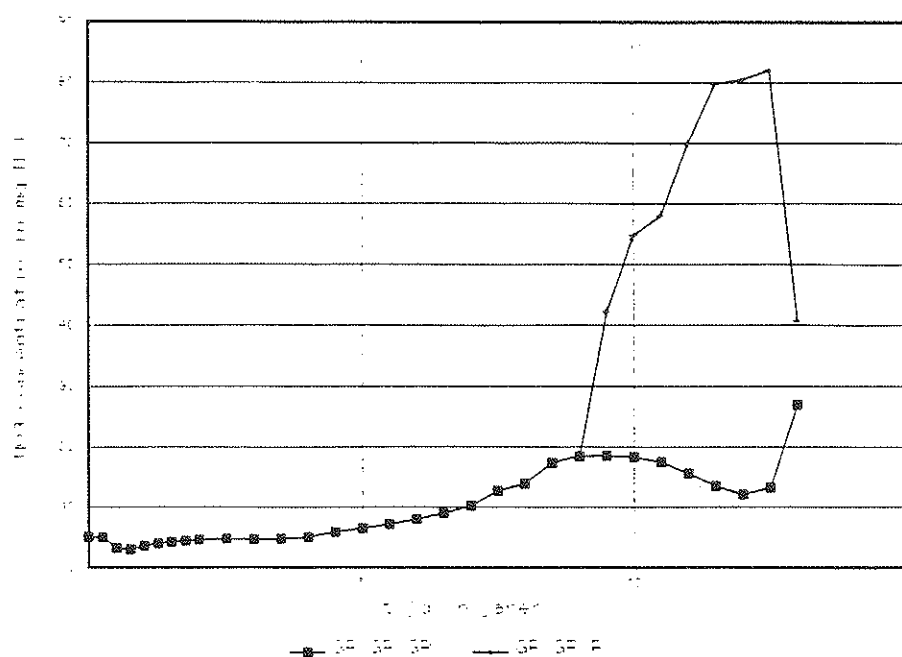
scenario	B(a)P-vracht in kg (reductiepercentage t.o.v. situatie zonder recirculatie)			
	onderwaterfase	tussenwaterfase	bovenwaterfase	totaal
0 (GR GR GR)	2,2	1,0	1,0	4,2
1 (R R R)	1,1 (50%)	0,3 (70%)	0 (100%)	1,4 (67%)
2 (GR R R)	2,2	0,3 (70%)	0 (100%)	2,5 (40%)
3 (GR GR R)	2,2	1,0	0 (100%)	3,2 (24%)
4 (GR R GR)	2,2	0,3 (70%)	1,0	3,5 (17%)



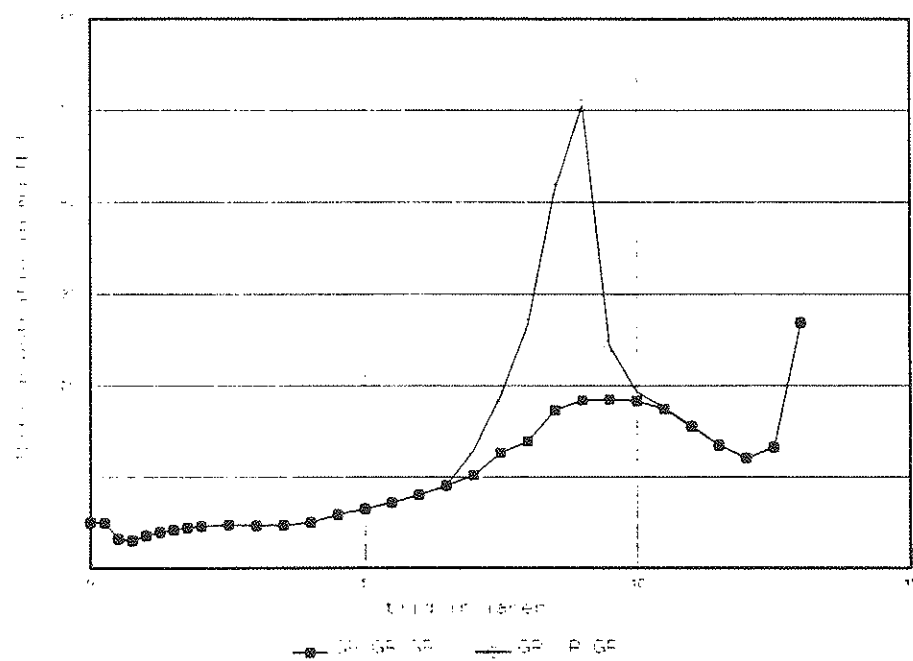
Figuur I De concentratie Nitraat-N voor scenario 0 en scenario 1



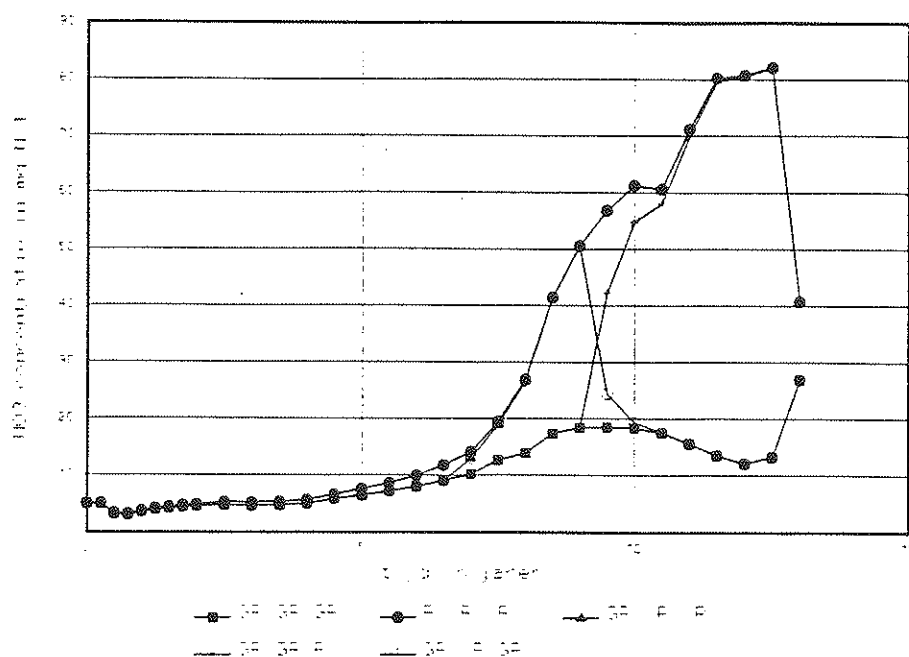
Figuur II De concentratie Nitraat-N bij scenario 0 en scenario 2



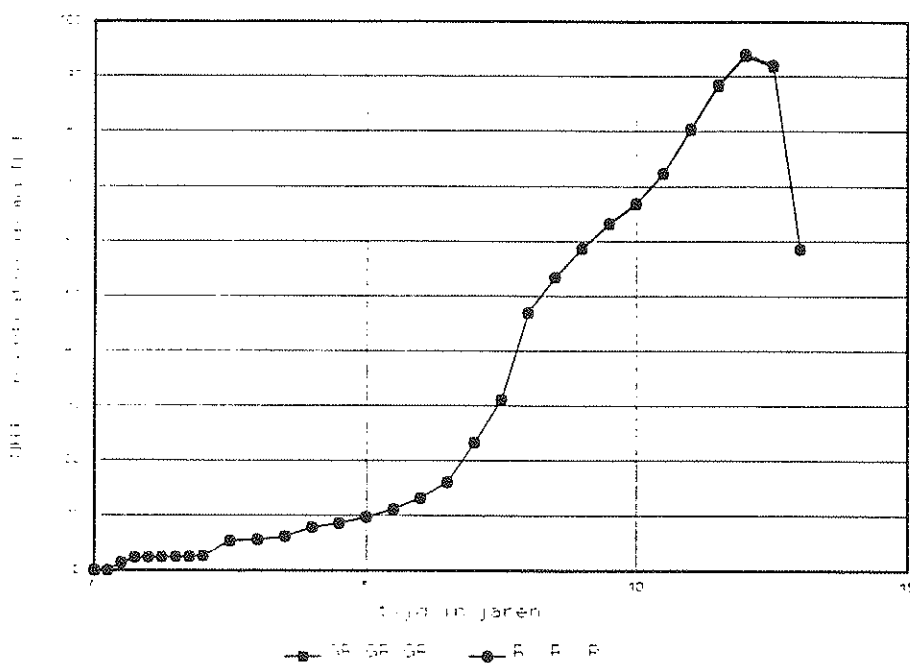
Figuur III De concentratie Nitraat-N bij scenario 0 en scenario 3



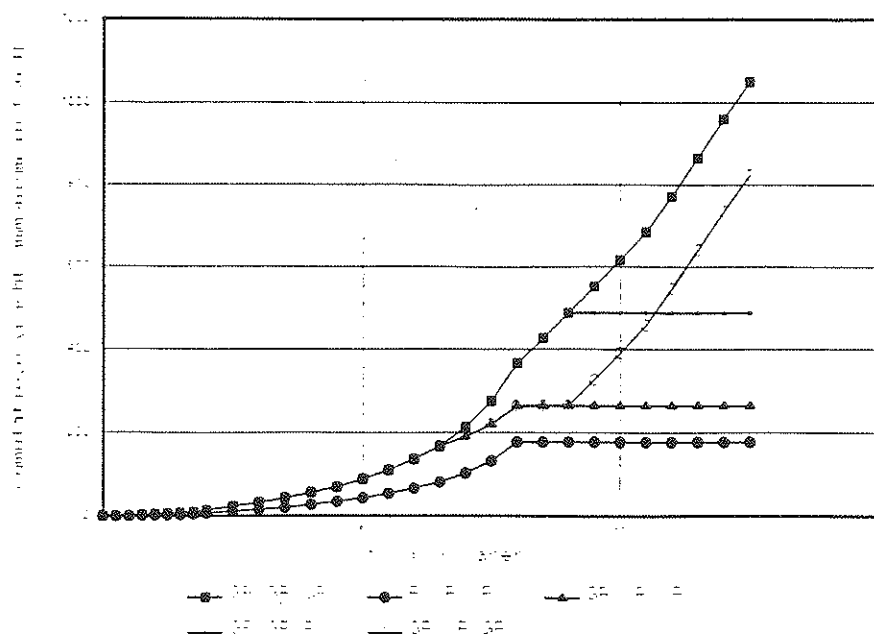
Figuur IV De concentratie Nitraat-N bij scenario 0 en scenario 4



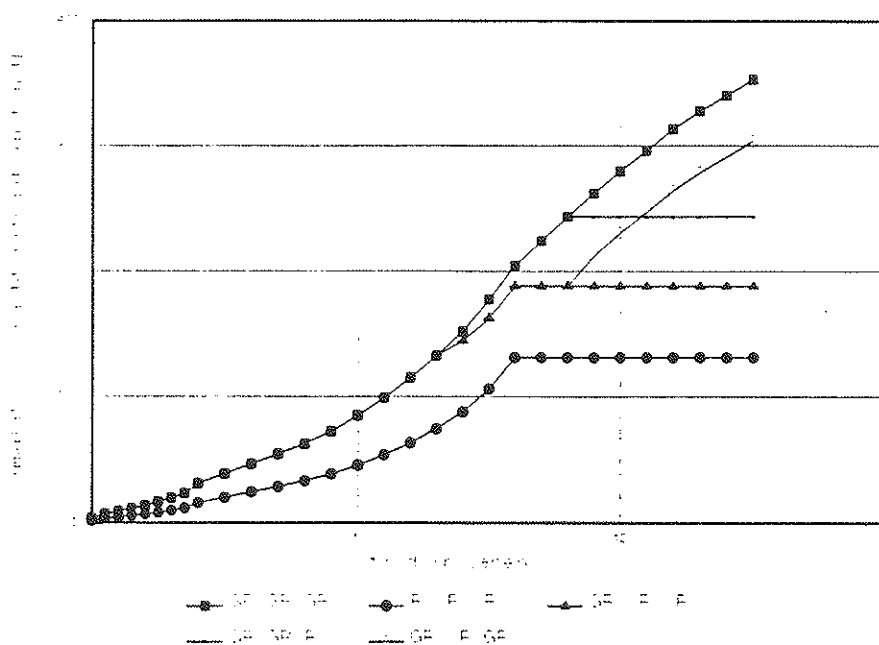
Figuur V De concentratie Nitraat-N bij de verschillende recirculatie scenario's



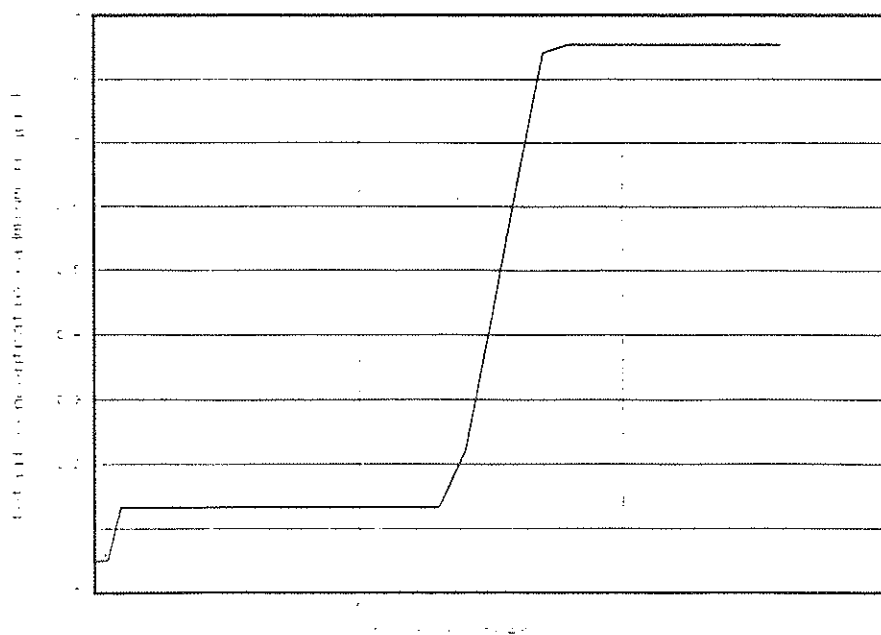
Figuur V De concentratie Ammonium-N bij scenario 0 en scenario 1



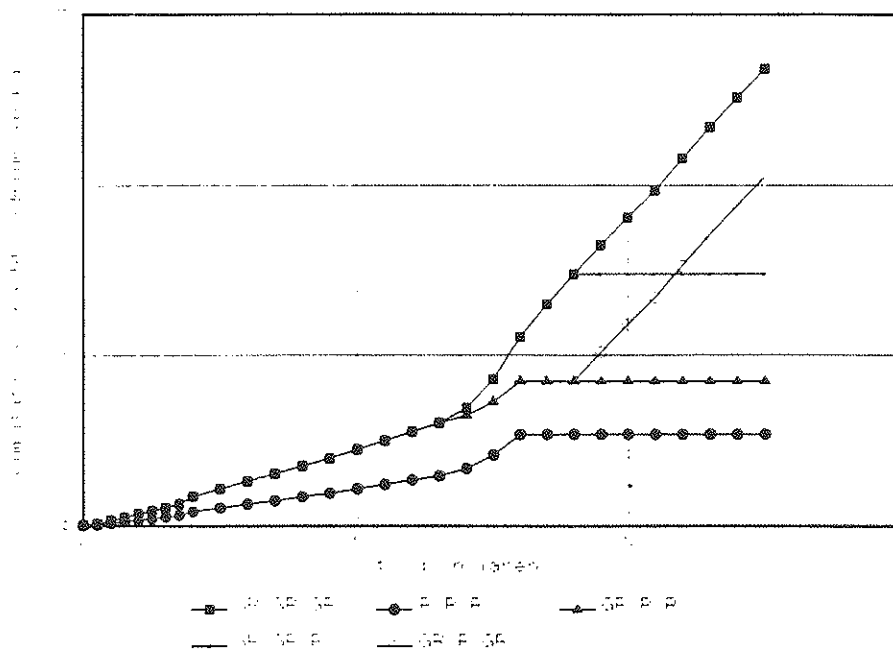
Figuur VI Cumulatieve vracht Ammonium-N voor de vijf scenario's



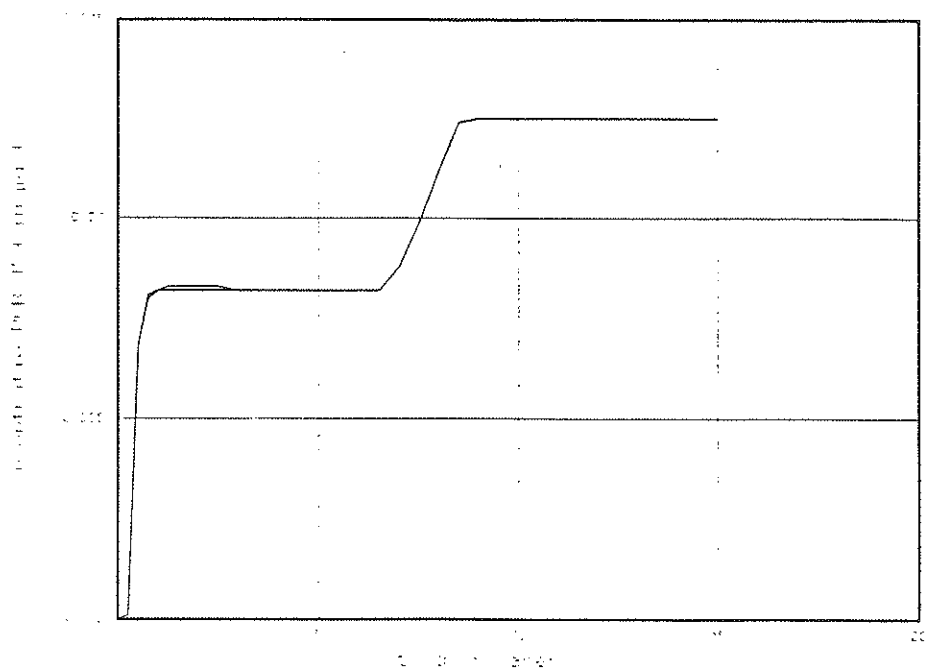
Figuur VII Cumulatieve vracht Nitraat-N voor de vijf scenario's



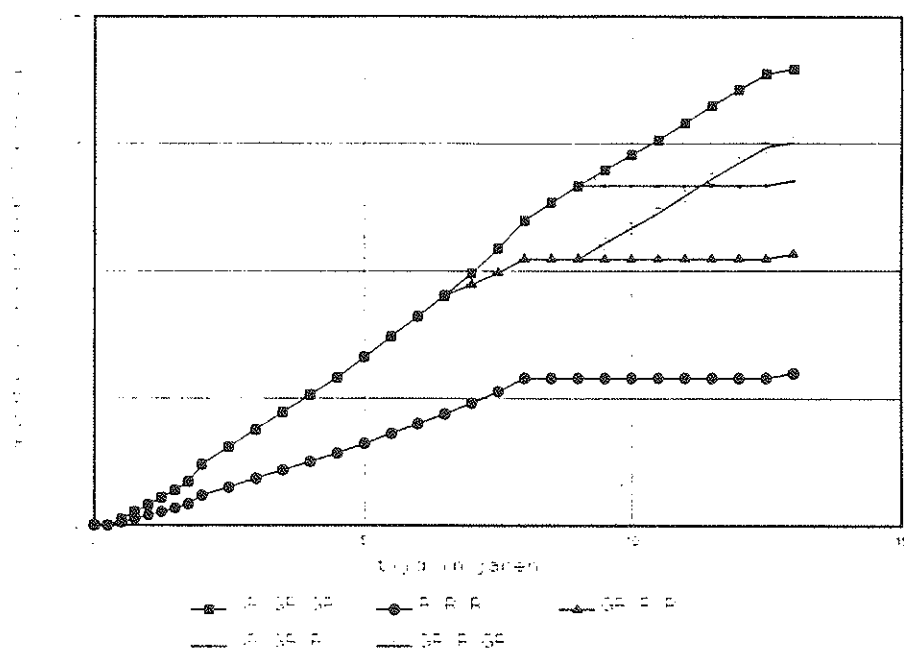
Figuur VIII Totaal concentratie cadmium in het retourwater



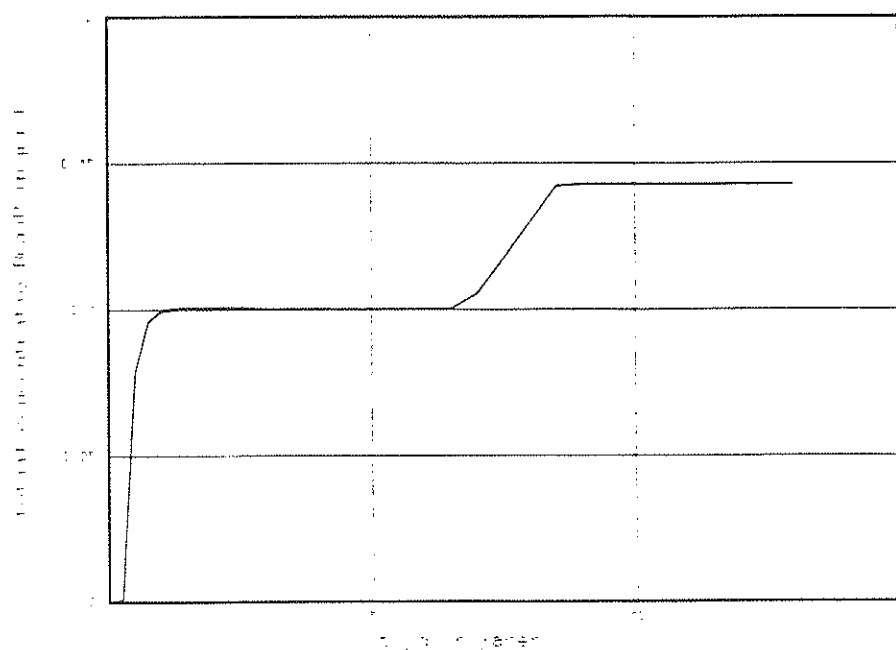
Figuur IX Cumulatieve vracht aan cadmium in het retourwater voor de vijf alternatieven



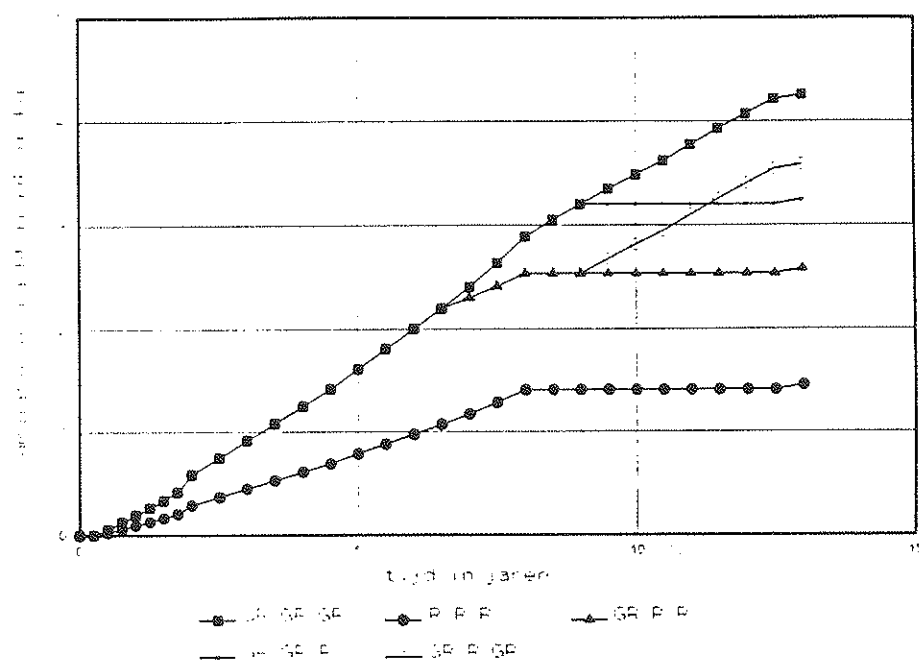
Figuur X Totaal concentratie PCB 153 voor de vijf scenario's



Figuur XI Cumulatieve vracht PCB 153 voor de scenario's



Figuur XII Totaal concentratie Benzo (a) Pyreen voor de verschillende scenario's



Figuur XIII Cumulatieve vracht aan Benzo (a) Pyreen voor de vijf scenario's

Bijlage 5: Hoeveelheden jetwater per m³ situ-specie afhankelijk van de dichtheid

