

BIBLIOTHEEK
Bouwdienst Rijkswaterstaat
Postbus 20.000
3502 LA Utrecht

DI 66992

ONDERZOEK NAAR ZUIVERINGSTECHNISCHE MAATREGELEN VOOR BAGGERSPECIEDEPOT AVERIJHAVEN TE VELSEN

DIRECTORAAT-GENERAAL RIJKSWATERSTAAT
DIRECTIE NOORD-HOLLAND

RIJKSWATERSTAAT NOTA ANWW 95.13

EINDRAPPORT

NOVEMBER 1995

Barbarossastraat 35
Postbus 151
6500 AD Nijmegen
Telefoon (024) 328 42 84
Telefax (024) 360 47 37



HASKONING
Ingenieurs- en
Architectenbureau

Z5705



ONDERZOEK NAAR ZUIVERINGSTECHNISCHE MAATREGELEN VOOR BAGGERSPECIEDEPOT AVERIJHAVEN TE VELSEN

DIRECTORAAT-GENERAAL RIJKSWATERSTAAT
DIRECTIE NOORD-HOLLAND

RIJKSWATERSTAAT NOTA ANWW 95.13

EINDRAPPORT

NOVEMBER 1995

Goedgekeurd: ir. A.H.H.M. Schomaker Datum: 9-11-1995 Paraaf: 

november 1995/5K
1332.D1591.A0/R005/TS/JVS

Rijksdienst dr. N-Holland
Bouwdienst Rijkswaterstaat
Postbus 20.000
3502 LA Utrecht

**INHOUDSOPGAVE**

	blz
SAMENVATTING	
1. INLEIDING	1
2. PROBLEEMSTELLING EN DOEL VAN HET ONDERZOEK	2
2.1 Probleemstelling	2
2.2 Doelstelling van het onderzoek	3
3. GESCHIEDENIS EN HUIDIGE SITUATIE VAN DE INRICHTING	4
3.1 Locatie van de inrichting	4
3.2 Technische beschrijving van de huidige inrichting	5
3.3 Historie en huidige situatie van de inrichting	5
4. TOEKOMSTIGE SITUATIE VAN DE INRICHTING	8
4.1 Technische beschrijving van de toekomstige inrichting	8
4.2 Bedrijfsvoering van de toekomstige inrichting	11
5. OPZET EN UITGANGSPUNTEN VAN HET ONDERZOEK	13
5.1 Opzet van het onderzoek	13
5.1.1 Algemeen	13
5.1.2 Biologische stikstofverwijdering	13
5.1.3 Recirculatie retourwater	13
5.1.4 Depotmanagement	14
5.2 Uitgangspunten	14
5.2.1 Algemene uitgangspunten	14
5.2.2 Debieten	15
5.2.3 Concentraties en vrachten aan ammonium-stikstof	16
6. RESULTATEN BIOLOGISCHE STIKSTOFVERWIJDERING	18
6.1 Inleiding	18
6.2 Relevante processen	18
6.2.1 Stikstof	18
6.2.2 Zuurstof	20
6.2.3 CZV	21
6.2.4 Algengroei	21
6.2.5 Watertemperatuur	22
6.3 Uitgangspunten	22
6.3.1 Waterhoeveelheden	22
6.3.2 Belasting met $\text{NH}_4^+ \text{-N}$	23
6.4 Natuurlijke of technologische nitrificatie	27
6.4.1 Simulatie van de natuurlijke nitrificatie	28
6.4.2 Technologische nitrificatie	29
6.5 Denitrificatie	30
6.5.1 Natuurlijke denitrificatie	31
6.5.2 Technologische denitrificatie	31
6.6 Aanbevelingen voor onderzoek op pilot-schaal	33



7.	RESULTATEN RECIRCULATIE RETOURWATER	34
7.1	Inleiding	34
7.2	Debieten	34
7.3	Kwaliteit van het retourwater	35
7.4	Lozing retourwater	36
8.	RESULTATEN DEPOTMANAGEMENT	37
8.1	Vulscenario's en stortplanning	37
8.2	Consolidatie bevorderende maatregelen	37
8.3	Toepassing van maatregelen, die de natuurlijke stikstofverwijdering bevorderen	38
8.4	Bedrijfsvoering buiten het depot	38
8.5	Eindinrichting	38
9.	EVALUATIE, CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	39
9.1	Evaluatie	39
9.2	Conclusies	40
9.3	Aanbevelingen	41
	REFERENTIES	42
	LIJST VAN SYMBOLEN EN BEGRIPPEN	44

Bijlage 1: Simulatie van nitrificatie in een baggerdepot



SAMENVATTING

In opdracht van Rijkswaterstaat Directie Noord-Holland en in nauw overleg met RIZA is door HASKONING een literatuuronderzoek verricht naar de mogelijke maatregelen om de stikstofemissie naar het oppervlaktewater via de spui van het te lozen retourwater bij het baggerspeciedepot Averijhaven te Velsen te beperken. Het onderzoek is begeleid door de heren F. Visser, J. Graansma en V. Schaap van Rijkswaterstaat Directie Noord-Holland en de heer J. Hartnack van RIZA.

Door het aanbrengen van een 10 m hoge dijk rondom het bestaande depot is er nog capaciteit beschikbaar voor het storten van een in situ volume aan baggerspecie van 1.450.000 m³. Over een geplande stortperiode van 12 jaar komt dit overeen met een gemiddelde van circa 120.800 m³ in situ specie per jaar of circa 330 m³ per dag.

In het onderzoek is uitgegaan van twee scenario's wat betreft het vullen van het depot. Met het 'constante schijf'-scenario wordt tijdens het vullen een constante dikte van de op de specie staande waterschijf gehandhaafd. Indien geen recirculatie van retourwater voor gebruik als perswater voor het verpompen van de storten specie wordt toegepast, zal een in de tijd min of meer constante hoeveelheid retourwater vrijkomen.

Bij het 'maximum volume'-scenario wordt het depot eerst tot het maximum peil gevuld zonder retourwater te lozen. Zonder recirculatie van retourwater neemt de dikte van de waterschijf geleidelijk aan toe en vindt lozing van retourwater pas plaats na het bereiken van het maximum depotpeil.

Indien geen recirculatie van retourwater wordt toegepast zal tijdens het storten dagelijks gemiddeld circa 145 m³ sedimentatiewater, circa 84 m³ consolidatiewater en circa 31,5 m³ neerslagoverschot ontstaan. Het totale retourwaterdebiet komt dan op circa 260 m³ per dag. Uitgaande van een NH₄⁺-N concentratie van 60 mg/l in het sedimentatiewater (water dat vrijkomt bij sedimentatie van specie na het storten) en van 120 mg/l in het consolidatiewater (water dat vrijkomt bij de zetting van de specie in het depot) is berekend dat tijdens de vulfase dagelijks een stikstofvracht van circa 50 kg N aan het opstaande water in het depot wordt toegevoerd. Deze vracht is gecorrigeerd voor de geringe toevoer aan stikstof via neerslag en afbraak van organisch materiaal in de gestorte specie.

Met behulp van computersimulaties is de capaciteit van de natuurlijke nitrificatie (biologische omzetting van ammonium in nitraat) in het depot zelf berekend. De simulaties laten zien dat gedurende de vulfase van het depot deze natuurlijke nitrificatie zowel bij 1 m opstaand water (constante schijf) als bij een schijfdikte van 4 m (bij maximaal volume) voldoende groot is om de aangevoerde stikstofvracht om te zetten in nitraat.

Een maximale vracht van 100 kg NH₄⁺-N/d is volgens de simulatie nog juist door natuurlijke nitrificatie te verwerken. Bij hogere vrachten zouden, met name in de zomer, ernstige problemen met het zuurstofgehalte van het water op kunnen treden. Bij het eventueel storten van de gemiddelde jaarlijkse hoeveelheid specie in een tijdsbestek van vier maanden lijken zich geen problemen voor te doen. Wel wordt in dat geval het zuurstofgehalte gedurende enige tijd zeer laag.

Indien echter een grote bedrijfszekerheid wordt verlangd met betrekking tot de te lozen NH₄⁺-N gehalten kan overwogen worden externe, technologische nitrificatie toe te passen. Wat betreft exploitatiekosten ligt toepassing van een biorotorsys-



teem dan het meest voor de hand. Zowel de investeringskosten als de energiekosten zijn voor een dergelijk systeem aanzienlijk lager dan voor een actiefslibstelsysteem en een belucht zandfilter.

De mate van natuurlijke denitrificatie (biologische omzetting van nitraat in stikstofgas) is met name afhankelijk van de beschikbaarheid van voldoende CZV, die voor dit proces benodigd is. De bijdrage van natuurlijke denitrificatie aan de verwijdering van stikstof is echter moeilijk vast te stellen, doordat er nauwelijks gegevens beschikbaar zijn van vergelijkbare depots. In verband met de bedrijfszekerheid wordt voorgesteld om vooralsnog externe, technologische denitrificatie toe te passen met behulp van het zandfilter, dat wordt ingezet om het gehalte aan zwevende stof in het te lozen retourwater te reduceren tot 20 mg/l. In welke mate daarbij een externe CZV-bron zoals methanol moet worden toegediend, dient in de praktijk te worden vastgesteld. In dit verband dient te worden nagegaan in hoeverre algengroei en -afsterving of het inzetten van de slibfractie (vrijkomend bij cyclonage) van een partij te storten specie als CZV-bron een rol kan spelen.

Bij beide scenario's zal bij recirculatie van retourwater geen lozing van retourwater plaats hebben, omdat de behoefte aan perswater ($0,85 \text{ m}^3$ per m^3 in situ specie, overeenkomend met $330 \times 0,85 = 280 \text{ m}^3/\text{dag}$) groter is dan de productie aan retourwater ($260 \text{ m}^3/\text{dag}$). Deze constatering houdt in dat er bij recirculatie van retourwater bij het depot tijdens de vulfase geen zuiveringstechnische maatregelen behoeven te worden getroffen. Voorgesteld wordt om alleen al om deze reden recirculatie van retourwater toe te passen. Overigens kan, afhankelijk van de wijze van baggeren en in depot brengen van de specie, de hoeveelheid perswater in de praktijk een veelvoud van het in situ volume aan baggerspecie bedragen. Dit is bijvoorbeeld gebleken is tijdens het storten van 50.000 m^3 baggerspecie in augustus 1995, waarbij een totaal stortvolume van 200.000 in depot is gebracht.

Om de natuurlijke stikstofverwijdering in het depot Averijhaven te bevorderen worden het volgende depotmanagement tijdens de vulfase voorgesteld:

- recirculatie van retourwater voor gebruik als perswater;
- minimaliseren van het gebruik van perswater;
- handhaving van een waterschijfdikte van 1 m op de gestorte specie vanaf de start van de vulperiode;
- gelijkmatig verdelen van de te storten specie over het depotoppervlak;
- alleen toepassen van consolidatie bevorderende maatregelen indien dit aan het eind van de stortperiode in verband met de stortcapaciteit noodzakelijk mocht blijken.

In aanvulling op de eerder genoemde aanbevelingen ten aanzien van natuurlijke denitrificatie wordt op grond van dit onderzoek aanbevolen om onderzoek te verrichten naar:

- de invloed van sterke schommelingen in de saliniteit, van de mogelijke aanwezigheid van toxische componenten en van het mogelijk ontstaan van fosfaattekort op de biologische stikstofverwijdering;
- te hanteren grenswaarden voor natuurlijke nitrificatie, boven welke waarden het storten tijdelijk gestaakt zou dienen te worden;
- de te realiseren rendementen in de stikstofverwijdering (zowel nitrificatie als denitrificatie) bij zeer lage temperaturen.



1. INLEIDING

In opdracht van Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, Directie Noord-Holland en in nauw overleg met RIZA is door HASKONING een literatuuronderzoek verricht naar de toepassingsmogelijkheden van technische maatregelen om de stikstofemissie naar het oppervlaktewater via de spui van het te lozen retourwater bij het baggerspeciedepot Averijhaven te Velsen te beperken. Het onderzoek is begeleid door de heren F. Visser, J. Graansma en V. Schaap van Rijkswaterstaat Directie Noord-Holland en de heer J. Hartnack van RIZA.

Het literatuuronderzoek alsmede een door Rijkswaterstaat in eigen beheer te verrichten veldonderzoek naar de kwaliteit van het bestaande opstaande water in het depot vormen de eerste fase van de onderzoeksverplichting naar de emissiebeperkende maatregelen van stikstof en zwevende stof zoals voorgeschreven in de op 9 februari 1995 verleende WVO-vergunning, kenmerk AWE 191652 | ref.1 | . De tweede fase van de onderzoeksverplichting betreft een pilot-plant onderzoek naar nitrificatie/denitrificatie op de locatie, dat gebaseerd is op de resultaten van dit literatuuronderzoek en het veldonderzoek.

Voor het literatuuronderzoek is gebruik gemaakt van de door Rijkswaterstaat beschikbaar gestelde informatie | ref.1 t/m 9 | , en van door HASKONING geraadpleegde overige relevante literatuurbronnen | ref.10 t/m 28 | .

In dit rapport zijn de resultaten van het literatuuronderzoek vastgelegd. Achtereenvolgens komen aan de orde:

- probleemstelling en doelstelling van het onderzoek (hoofdstuk 2);
- locatie, technische beschrijving, historie en huidige situatie van de inrichting (hoofdstuk 3);
- technische beschrijving en bedrijfsvoering van de toekomstige inrichting (hoofdstuk 4);
- opzet en uitgangspunten van het literatuuronderzoek (hoofdstuk 5);
- resultaten van het onderzoek (hoofdstuk 6, 7 en 8);
- evaluatie, conclusies en aanbevelingen (hoofdstuk 9).

Het rapport wordt afgesloten met een referentielijst en een lijst van gebruikte symbolen en begrippen.

Tenslotte wordt in bijlage 1 een beschrijving en de resultaten gegeven van toepassing van een simulatiemodel voor nitrificatie in een baggerspeciedepot.

2. PROBLEEMSTELLING EN DOEL VAN HET ONDERZOEK

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de probleemstelling die aan het literatuuronderzoek ten grondslag ligt, en vervolgens op de doelstelling van het verrichte onderzoek.

2.1 Probleemstelling

Rijkswaterstaat, Directie Noord-Holland heeft het voornemen om de voormalige Averijhaven te Velsen in te richten en te gebruiken voor het storten van verontreinigde baggerspecie. Tijdens het storten en in de navolgende bedrijfsfasen komt retourwater vrij, dat bestaat uit:

- het neerslagoverschot;
- pers- of jetwater dat gebruikt wordt voor het met een bakkenzuiger verpompen van de te storten baggerspecie vanuit de beunschepen;
- consolidatiewater zijnde het (poriën)water dat vrijkomt bij de zetting van de gestorte specie.

De hoeveelheid retourwater die afgevoerd dient te worden, is sterk afhankelijk van de hoeveelheid gestort materiaal en zal minimaal 50 m³ per dag en maximaal 600 m³ per dag bedragen | ref.1 | . Zonder peilbeheer (i.e. bij een toename dikte van de opstaande waterschijf) zal het retourwaterdebiet enigszins afnemen als gevolg van de geringe wegzijging naarmate het depot verder wordt gevuld.

De aard van de verontreinigingen in het te lozen retourwater kan worden gekarakteriseerd met onder meer de volgende parameters | ref.1 | :

- zwevende stof;
- stikstofverbindingen (ammonium en nitraat);
- organische (micro)verontreinigingen (PAK en PCB);
- zware metalen.

De omvang van de verontreinigingen in het te lozen retourwater worden hoofdzakelijk bepaald door de kwaliteit van de in het depot aanwezige en nog te storten specie, de hoeveelheid te lozen retourwater, de fase waarin het depot zich bevindt (onderwater- of bovenwaterfase) en de fase waarin de berging zich bevindt (vulfase c.q. consolidatiefase).

Om de lozing van zwevende stof en daarmee de lozing van de microverontreinigingen (PAK, PCB, zware metalen) tot een minimum te beperken is in de vergunning de toepassing van een dynamisch zandfilter voorgeschreven.

Met betrekking tot de stikstof-emissie worden in de vergunning biologische zuiveringstechnische werken voorgeschreven. Aangezien de benodigde ervaring met het afvalwater van grootschalige baggerdepots ontbreekt, is in de vergunning gesteld dat de aanvrager een onderzoek dient uit te voeren naar de biologische stikstofverwijdering, te weten nitrificatie (omzetting van ammonium in nitraat) en denitrificatie (omzetting van nitraat in stikstofgas).

Uit onderzoek van het RIZA | ref.2 | naar biologische N-verwijdering in grootschalige depots kan, rekening houdend met de constructie van het depot Averijhaven, worden geconcludeerd dat nitrificatie met behulp van een externe unit moet worden uitgevoerd. Met name uit kostenoverwegingen heeft echter de mogelijkheid om in het depot zelf tot zoveel mogelijk nitrificatie te komen de



voorkeur van de initiatiefnemer. Ook denitrificatie zou plaats kunnen hebben in het depot zelf hetzij in een externe unit.

De in de vergunning opgenomen onderzoeksverplichting naar beperking van de stikstofemissie schrijft voor dat met een pilot plant de toepasbaarheid van de meest veelbelovende nitrificatie en denitrificatie technieken dient te worden onderzocht. Om tot de meest geschikte wijze van nitrificatie/denitrificatie bij depot Averijhaven te komen is door de vergunningverlener gesteld dat daartoe vooraf een literatuuronderzoek dient te worden uitgevoerd, gericht op een ammonium-stikstofgehalte in de spui van het te lozen retourwater met een jaargemiddelde van 15 mg/l.

In dit literatuuronderzoek dient aandacht te worden besteed aan | ref.1,3 | :

- het stikstofgehalte in de spui van het te lozen retourwater;
- de mogelijkheden van nitrificatie door middel van een biorotor of een zandfilter met nitrificatie, zo mogelijk als aanvullende techniek op nitrificatie in het depot zelf. Nitrificatie in het depot heeft daarbij de voorkeur;
- de mogelijkheden van denitrificatie in het depot en/of een (externe) denitrificatie-unit, waarbij denitrificatie in het depot de voorkeur heeft;
- het effect van nitrificatie en denitrificatie op de emissie en
- de financiële consequenties van de hierboven beschreven mogelijkheden.

2.2 Doelstelling van het onderzoek

Op basis van de hiervoor omschreven probleemstelling is door Rijkswaterstaat, Directie Noord-Holland als doelstelling van het literatuuronderzoek geformuleerd: het vaststellen van de mogelijkheden om bij het depot Averijhaven:

- de emissie van ammonium-stikstof in de spui van het te lozen retourwater tot een jaargemiddelde concentratie van 15 mg $\text{NH}_4^+\text{-N}$ per liter te beperken;
- denitrificatie in het depot of met behulp van een extern zuiveringssysteem te laten plaatsvinden.

Daartoe dienen in het literatuuronderzoek de volgende mogelijkheden van toepasbaarheid van voor te schrijven maatregelen te worden onderzocht:

- zuiveringstechnische maatregelen;
- recirculatie van retourwater;
- optimaal depotmanagement.

Bij het depotmanagement dient tevens rekening te worden gehouden met de eisen die in de WVO-vergunning gesteld zijn ten aanzien van het zwevend stofgehalte in het te lozen retourwater.



3.2 Technische beschrijving van de huidige inrichting

De totale oppervlakte van het huidige depot in de voormalige Averijhaven bedraagt momenteel circa 95.000 m². De bodem van het depot ligt op circa 16 meter -NAP (oorspronkelijke diepte van de haven) en is 45 m breed en circa 160 m lang. Het bodemoppervlak bedraagt circa 8.470 m². In 1991 is de Averijhaven van de Buitenhaven afgesloten door het aanbrengen van een dam met een kruinhoogte van NAP + 5 m. De natte oppervlakte van het depot op deze hoogte bedraagt circa 84.500 m². Rekening houdend met de verschillende taludhellingen (variërend in plaats en hoogte) bedraagt de bruto inhoud van het huidige depot gemeten tot een niveau van NAP + 5 m circa 1.025.000 m³ | ref.4 | .

3.3 Historie en huidige situatie van de inrichting

De Averijhaven is in 1967 ingericht voor het afmeren van schepen in afwachting van reparatie. In de loop der jaren heeft de haven haar oorspronkelijke functie verloren en werd steeds meer gebruikt als (tijdelijk) opslagdepot voor baggerspecie. In de periode 1979-1991 is een totale hoeveelheid van 497.000 m³ klasse 3 en 4 baggerspecie, uitgedrukt in het volume dat de specie op de winplaats innam (in-situ volume), in de Averijhaven gestort (75.000 m³ in 1979, 246.000 m³ in 1985, 77.000 m³ in 1988, 99.000 m³ in 1991). Tenslotte is in september 1995 nog circa 50.000 m³ specie gestort. In totaal is derhalve een in-situ specievolume van circa 550.000 m³ in het depot aanwezig.

In juli 1992 lag de bovenzijde van de specie in het depot gemiddeld op NAP -2 m en lag de waterstand op NAP +0,47 m. De resterende inhoud van de stort tot NAP + 5 m bedroeg toen volgens het MER | ref.4 | circa 420.000 m³. In dit MER werd ervan uitgegaan dat in de periode 1993-1998 het specieniveau als gevolg van de voortschrijdende consolidatie met circa 2 meter zou dalen. Momenteel zal de bovenzijde van de specie naar verwachting dan circa 1 m lager liggen. Volgens de peil/inhoud relatie (zie § 4.1, figuur 4.4) komt een peil van NAP -3m overeen met een door de specie ingenomen volume van circa 400.000 m³. Wordt daar de in 1995 gestorte 50.000 m³ specie bijgeteld dan zal het totale specievolume nu circa 450.000 m³ bedragen waarbij het speciepeil volgens dezelfde figuur 4.4 weer op circa NAP -2m ligt. In dit onderzoek wordt verder uitgegaan van een situatie waarbij de nieuwe stortperiode van het (uitgebreide) depot op zijn vroegst per einde 1996 start. Als gevolg van voortschrijdende consolidatie en neerslag zal het opstaande water in het depot in volume toenemen. Uitgangspunt bij het onderzoek is dat op de specie vooralsnog een waterschijf met een dikte van circa 2,5 m staat bij aanvang van het storten in 1996.

De gestorte specie is matig verontreinigd met PAK en sterk verontreinigd met zink en lood. Op grond van deze parameters is alle specie in het depot bij toetsing op de normering uit de Derde Nota Waterhuishouding te kwalificeren als klasse 4.

Op 8 augustus en 3 oktober 1995 is de kwaliteit van het opstaande water van het depot Averijhaven bepaald respectievelijk vóór en na het storten van 50.000 m³ baggerspecie | ref.5 | . Tabel 3.1 geeft een overzicht van de analyseresultaten. Uit deze gegevens kan opgemaakt worden dat de kwaliteit van het opstaande water voor het storten van de specie goed was (waarden onder of net boven (zink) streefwaarden volgens Evaluatienota Water). Uit de lage waarde van de saliniteit kan worden afgeleid dat het opstaand water circa 3x verdund is met in het



verleden gevallen neerslag. De verdunning is gelijk aan de verhouding van de saliniteit van zeewater (35 ‰) en die van het huidige opstaande water (12‰), ervan uitgaande dat de saliniteit in de Averijsaven op het moment van afsluiting met damwand overeenkomt met die van zeewater.

Als gevolg van het storten zijn met name de gehalten aan CZV, ammoniumstikstof en zwevende stof gestegen, waarbij de laatste parameter tot boven de lozingsnorm van 20 mg/l is gestegen. Verder valt het lage gehalte aan nitraatstikstof op. In hoeverre denitrificatie hierbij een rol speelt is vooralsnog niet aan te geven. Het verder volgen van de ammonium- en nitraat gehalten in de tijd kan hier wel meer uitsluitsel over geven.



Tabel 3.1. Analyseresultaten kwaliteit opstaand water baggerspeciedepot
Averijhaven voor en na het storten van 50.000 m³ baggerspecie in
augustus 1995 | ref.5 | .

COMPONENT		GEHALTE VOOR STORT ¹⁾	GEHALTE NA STORT ¹⁾
Ph	-	9,1	8,2
zuurstof	mg/l	3,6	10
saliniteit	‰	12,1	-
BZV ₅	mg O ₂ /l	15	3
CZV	mg O ₂ /l	89	720
NH ₄ -N	mg N/l	2,2	12
NO ₃ -N	mg N/l	0,07	0,06
Zwevende stof	mg/l	20	37
Cadmium	µg/l	< 1	< 0,1
Chroom	µg/l	< 1	7
Koper	µg/l	3,0	3
Nikkel	µg/l	< 1	< 1
Lood	µg/l	< 5	< 5
Zink	µg/l	12	16
Arseen	µg/l	< 45	11 ²⁾
Kwik	µg/l	< 0,03	< 0,03
EOX	mg/l	< 0,1	< 0,1
PAK			
- Naftaleen	µg/l	< 0,06	< 0,05
- Acenaftyleen	µg/l	< 0,2	< 0,09
- Acenaftheen	µg/l	< 0,05	< 0,05
- Fluoreen	µg/l	< 0,01	0,02
- Fenanthreen	µg/l	0,03	< 0,07
- Anthraceen	µg/l	< 0,01	0,01
- Fluorantheen	µg/l	0,03	0,25
- Pyreen	µg/l	0,01	0,03
- Benzo(a)anthraceen	µg/l	< 0,01	0,01
- Chryseen	µg/l	< 0,01	0,02
- Benzo(b)fluorantheen	µg/l	< 0,01	< 0,01
- Benzo(k)fluorantheen	µg/l	< 0,01	< 0,01
- Benzo(a)pyreen	µg/l	< 0,01	< 0,01
- Dibenz(a,h)anthraceen	µg/l	< 0,01	< 0,01
- Benzo(g,h,i)peryleen	µg/l	< 0,01	< 0,01
- Indeno(1,2,3-c,d)pyreen	µg/l	< 0,01	< 0,01
Totaal 6 Borneff	µg/l	< 0,1	0,3
Totaal 10 Leidraad	µg/l	< 0,2	0,3
Totaal 16 EPA	µg/l	< 0,3	0,4
PCB			
- PCB-28	µg/l	< 0,01	< 0,01
- PCB-52	µg/l	< 0,01	< 0,01
- PCB-101	µg/l	< 0,01	< 0,01
- PCB-118	µg/l	< 0,01	< 0,01
- PCB-138	µg/l	< 0,01	< 0,01
- PCB-153	µg/l	< 0,01	< 0,01
- PCB-180	µg/l	< 0,01	< 0,01
- Som 6 PCB's	µg/l	< 0,1	< 0,1
- Som 7 PCB's	µg/l	< 0,1	< 0,1

1. Datum monstername: vóór stort op 8 augustus 1995; na stort op 3 oktober 1995

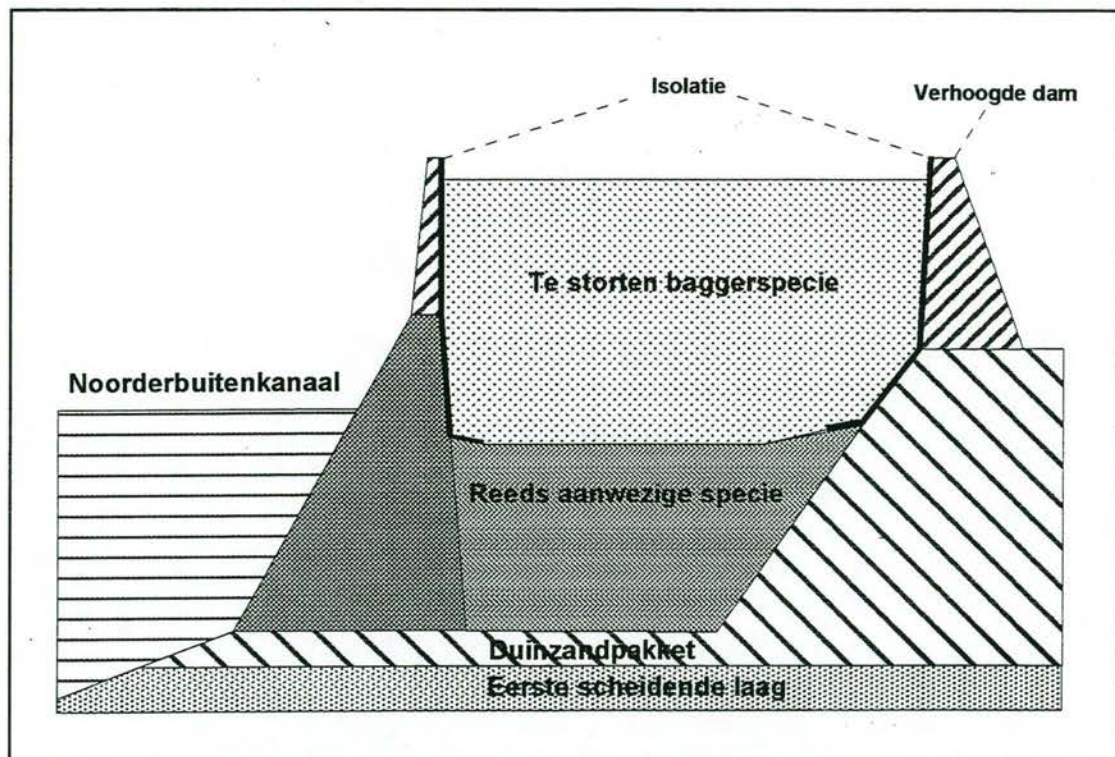
2. Waarde onder detectielimiet van analyse vóór stort door andere analysemethode

4. TOEKOMSTIGE SITUATIE VAN DE INRICHTING

In dit hoofdstuk wordt een technische beschrijving gegeven van de toekomstige inrichting. Daarna wordt de toekomstige bedrijfsvoering van de inrichting in algemene zin beschreven.

4.1 Technische beschrijving van de toekomstige inrichting

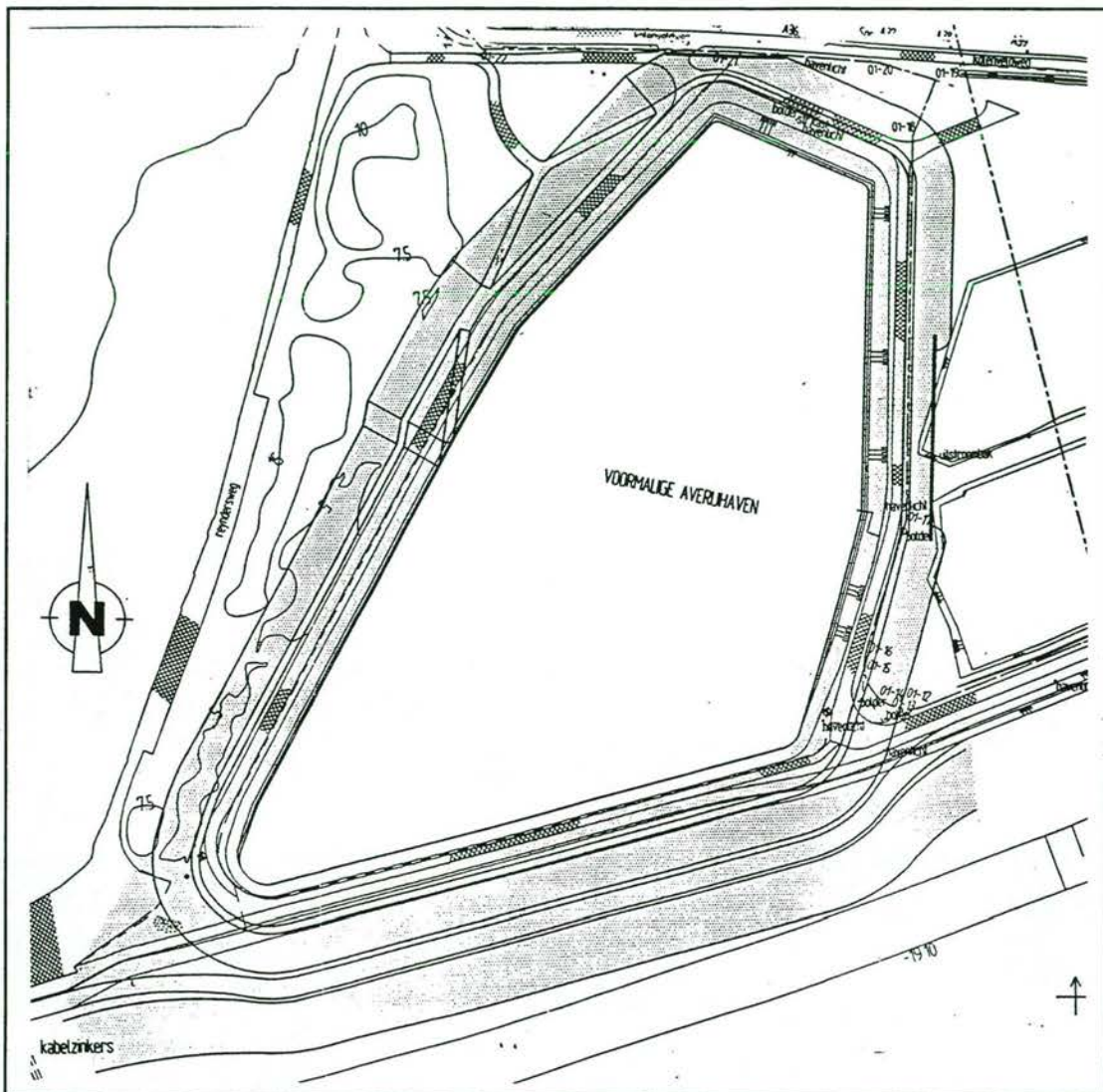
De inrichting zal naar verwachting op korte termijn in capaciteit worden uitgebreid door rondom de Averijhaven en ten dele op het terrein van Hoogovens (richting voormalige Werkhaven: zie figuur 3.1) een 10 m hoge dijk van staalslakken aan te leggen die zal reiken tot een niveau van NAP + 15m. Figuur 4.1 geeft een schematische weergave van de nieuwe inrichting, die in het MER Averijhaven als het volume-alternatief E-5 is aangemerkt | ref.8 |.



Figuur 4.1. Schematische weergave van toekomstige inrichting (Bron: MER Baggerspeciéstortplaats Averijhaven Velsen, Aanvulling | ref.8 |).

Ten behoeve van isolatie van het depot worden de taluds van de ringdijken aan de binnenzijde vanaf NAP -2,50 m (bij de bestaande damwand vanaf de bovenzijde van het bestaande kleipakket, eindigend op NAP + 5 m) voorzien van 2 mm dikke HDPE-folie.

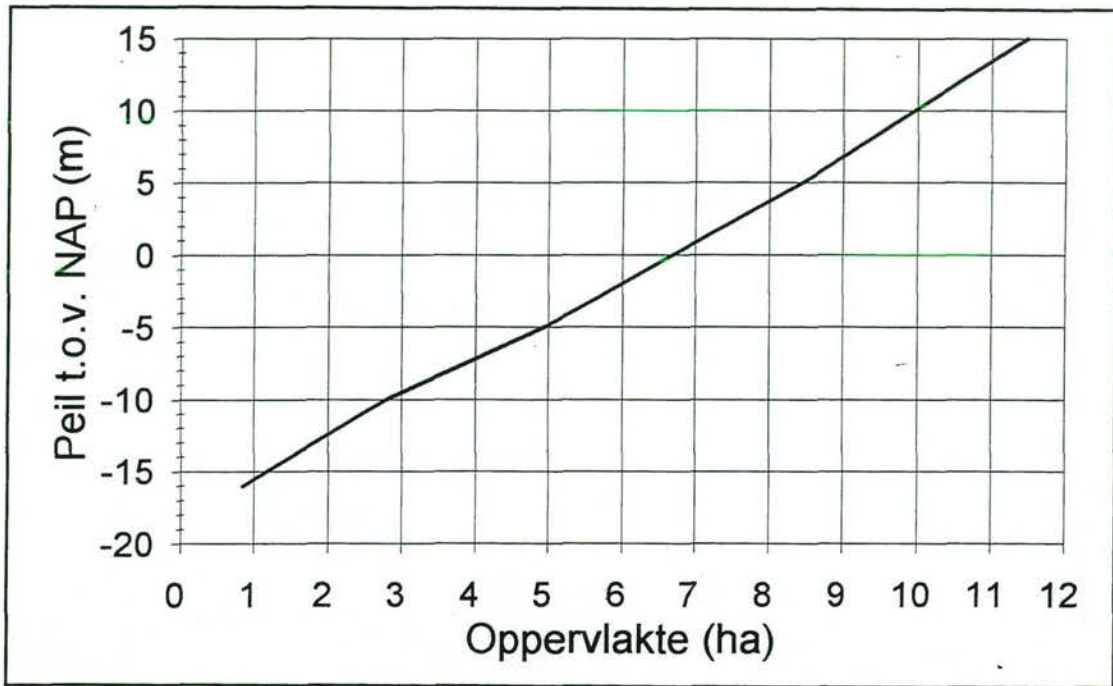
De lay-out van de nieuwe inrichting is weergegeven in figuur 4.2. De nieuwe inrichting zal aan de bovenzijde een totale oppervlakte hebben van circa 115.000 m². Figuur 4.3 geeft de relatie tussen oppervlakte en peil in het depot.



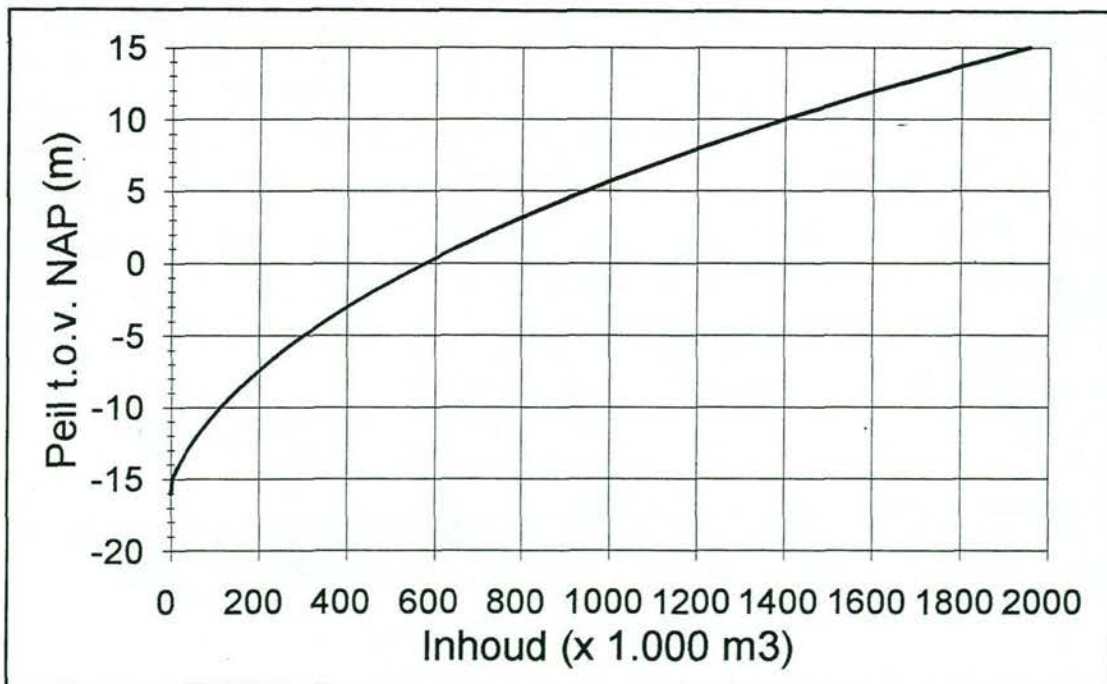
Figuur 4.2. Lay-out depot Averijhaven na uitbreiding; schaal 1:4000 (Bron: Schetsplan, tekeningnr. NHTZ-1995-75007, Rijkswaterstaat Directie Noord-Holland, februari 1995)

De bruto inhoud na uitbreiding gemeten tot een niveau van NAP + 15 m zal circa 1.950.000 m³ bedragen. In figuur 4.4 is de relatie tussen peil en de bruto inhoud van het depot weergegeven. Rekening houdend met het reeds ingenomen depotvolume door in het verleden gestorte specie (zie § 3.3) bedraagt het resterende bruto beschikbare volume tot aan de kruin van de nieuwe inrichting $1.950.000 - 450.000 \text{ m}^3 = 1.500.000 \text{ m}^3$. Rekenend met een depotfactor¹ van 1,04 betekent dit dat minimaal een in situ volume van $1.500.000 : 1,04 = 1.442.500 \text{ m}^3$ aan baggerspecie nog gestort zou kunnen worden.

¹ verhouding van het specievolumen aan het eind van de stortfase, waarbij rekening is gehouden met 10% gasontwikkeling, en het in situ specievolumen. In formulevorm:
depotfactor = $(\text{dichtheid van specie aan het einde van de vulfase} - \text{dichtheid water}) / (\text{dichtheid van specie in situ} - \text{dichtheid water})$, waarbij dichtheid water is gesteld op 1.024 kg/m³.



Figuur 4.3. Relatie tussen peil en oppervlakte van depot Averijhaven na uitbreiding.



Figuur 4.4. Relatie tussen peil en bruto inhoud van depot Averijhaven na uitbreiding.



Deze hoeveelheid komt overeen met het volume waarvan bij de aangevraagde activiteit (volume-alternatief E-5) is uitgegaan. Bij het onderzoek is uitgegaan van een beschikbare capaciteit voor afgerond 1.450.000 m³ te storten specie.

Als dikte van de waterschijf boven de specie bij het begin van de nieuwe vulperiode wordt voorsnog 2,5 m gehanteerd (zie § 3.3). Volgens figuur 4.4 betekent dit bij een peil van de specie op NAP -2m een totaal volume aan opstaand water van circa 615.000 - 460.000 = circa 155.000 m³.

4.2 Bedrijfsvoering van de toekomstige inrichting

Zoals in de vorige paragraaf is aangegeven is er in de nieuwe inrichting een stortvolume voor circa 1.450.000 m³ in situ specie beschikbaar. Uitgaande van de aangevraagde stortperiode van 12 jaar | ref.8 | betekent dit een gemiddelde stortcapaciteit van 120.000 m³ per jaar.

De te storten specie betreft zowel zoete als zoute klasse 3 en 4 baggerspecie. De specie zal hydraulisch worden gestort vanaf een aanlegplaats aan de voormalige Werkhaven. Voor het hydraulische transport van de specie zal het overtollige water in het depot (= retourwater) worden gebruikt. Met dit hergebruik van retourwater als perswater zal de hoeveelheid retourwater, die uiteindelijk vanuit het depot naar de Noorderbuitenhaven wordt geloosd, aanzienlijk worden beperkt. Het hergebruikte retourwater wordt aangeduid als recirculatiewater. Bij de beschrijving van de resultaten ten aanzien van de stikstofverwijdering in hoofdstuk 6 is in eerste instantie uitgegaan van een bedrijfsvoering waarbij geen retourwater wordt hergebruikt. In hoofdstuk 7 wordt nader ingegaan op het hergebruik van retourwater en de invloed daarvan op de kwantiteit en kwaliteit van het te lozen retourwater.

Voorsnog wordt ervan uitgegaan dat er gedurende het gehele jaar specie zal worden gestort. In deze studie is echter tevens nagegaan wat het effect is indien slechts gedurende een beperkte periode in het jaar gestort zal worden. Vanuit het oogpunt van zelfreinigend vermogen van het opstaand water van het depot ligt storten van specie in de zomermaanden het meest voor de hand. Biologische stikstofverwijdering verloopt immers sneller bij hogere watertemperaturen. In § 6.2.5 en bijlage 1 wordt ingegaan op de invloed van de temperatuur op de stikstofverwijdering.

De toekomstige hoeveelheid te lozen retourwater bij depot Averijhaven wordt (zonder hergebruik) bepaald door de som van:

- de hoeveelheid sedimentatiewater, i.e. het water dat vrijkomt tussen tijdstip van storten en aanvang van consolidatie;
- de hoeveelheid consolidatiewater i.e. het water dat na sedimentatie vrijkomt als gevolg van de consolidatie (zetting) van de specie;
- de hoeveelheid neerslagoverschot (conform aanvulling MER | ref.8 | gesteld op 100 mm per jaar).

Aangezien het depot reeds in de bovenwaterfase verkeert zal er geen verdringingswater vrijkomen. Verdringingswater is het water, dat bij aanvang van de vulfase reeds in het depot aanwezig is en dat door het storten van de baggerspecie wordt verdrongen en derhalve als retourwater moet worden geloosd.



In de bedrijfsvoering gedurende de vulfase van het depot (12 jaar) zijn wat betreft de lozing van retourwater twee uiterste vulscenario's indenkbare:

a. Het 'constante schijf'-scenario

Een bedrijfsvoering waarbij een constante dikte van de op de specie staande waterschijf wordt gehandhaafd. Het depot blijft in de bovenwaterfase. Indien geen recirculatie van retourwater wordt toegepast, zal dan een in de tijd min of meer constante hoeveelheid retourwater vrijkomen. Bij recirculatie van retourwater zal geen lozing van retourwater plaats hebben, aangezien dan (oppervlakte)water moet worden gesuppleerd om een vaste waterschijfdikte te kunnen handhaven.

b. Het 'maximum volume'-scenario

Een bedrijfsvoering waarbij het depot eerst tot het maximum peil wordt gevuld zonder retourwater te lozen. Zonder recirculatie van retourwater neemt de dikte van de waterschijf geleidelijk aan toe en vindt lozing van retourwater pas plaats na het bereiken van het maximum depotpeil. Met dit scenario zal het depot weer in een tussenwaterfase geraken. Vanaf het bereiken van het maximum peil zal dan weer verdringingswater vrijkomen dat als retourwater geloosd zal moeten worden. Evenals bij het andere, 'constante schijf'-scenario zal bij recirculatie van retourwater geen lozing van retourwater plaats hebben, omdat de behoefte aan recirculatiewater groter is dan de productie aan retourwater.

De twee scenario's laten naast een verschil in retourwaterdebieten ook verschillen in de kwaliteit van het retourwater zien. Naast het toegepaste vulscenario zullen ook de volgende factoren van invloed zijn op de stikstofconcentratie in het retourwater:

- jaarlijkse duur en periode (seizoen) van storten;
- kwaliteit van de gestorte baggerspecie. Voor deze studie is dan met name het gehalte aan ammonium-stikstof, uitgedrukt in kg N per m³ baggerspecie van belang;
- consolidatiesnelheid waardoor de flux van ammonium-stikstof naar het opstaande water wordt bepaald;
- het zwevende stofgehalte in het opstaande water, waarbij met name de slibfractie van belang is die voor de nitrificatie/denitrificatie verantwoordelijk is.
- de temperatuur van het opstaande water;
- het zuurstofgehalte in het opstaande water;
- klimaatinvloeden en dan met name windsnelheid en buitenluchttemperatuur.

Al deze factoren zijn bij dit onderzoek naar de toe te passen zuiveringstechnische maatregelen bij depot Averijhaven in beschouwing genomen.

5. OPZET EN UITGANGSPUNTEN VAN HET ONDERZOEK

In dit hoofdstuk wordt een beschrijving gegeven van de opzet van het onderzoek en worden de uitgangspunten en randvoorwaarden geformuleerd die aan de uitvoering van het onderzoek ten grondslag liggen.

5.1 Opzet van het onderzoek

5.1.1 Algemeen

Conform de doelstelling worden in het onderzoek drie hoofdaspecten onderscheiden waaraan eerst separaat aandacht zal worden besteed. De drie hoofdaspecten met de daarbij van belang zijnde deelonderwerpen betreffen:

- biologische stikstofverwijdering: theorie en praktijk van nitrificatie/denitrificatie, invloed van relevante procesfactoren, best uitvoerbare technieken, praktisch toepasbaarheid, rendementen en kosten;
- recirculatie retourwater: invloed op de kwaliteit en kwantiteit van het te lozen retourwater;
- depotmanagement: vulscenario's, stortperiode en -duur, toepassing van consolidatiebevorderende maatregelen, bedrijfsvoering van zuiveringstechnische maatregelen binnen en buiten het depot.

Na de separate behandeling van elk van deze aspecten (hoofdstuk 6, 7 en 8) zullen de daaruit voortkomende meest veelbelovende resultaten op elkaar worden afgestemd en geëvalueerd (hoofdstuk 9). Op basis van deze evaluatie zullen de eindconclusies en aanbevelingen voor optimaal zuiveringstechnische inrichting en bedrijfsvoering van depot Averijhaven worden geformuleerd.

5.1.2 Biologische stikstofverwijdering

Bij de beschrijving van de mogelijkheden ten aanzien van biologische stikstofverwijdering uit het retourwater wordt achtereenvolgens aandacht besteed aan:

- te verwachten input en concentraties aan ammonium-stikstof in het opstaande water in relatie tot de twee in § 4.2 genoemde vulscenario's;
- theorie biologische stikstofverwijdering;
- mate van natuurlijke (binnen het depot zelf optredende) nitrificatie en denitrificatie bij de twee eerder genoemde vulscenario's;
- de invloed op de natuurlijke stikstofverwijdering van relevante procesfactoren als watertemperatuur, windsnelheid, zwevende stofgehalte, zout- en nutriëntengehalte en eventueel aanwezige storende componenten in het retourwater;
- optimalisatie van natuurlijke stikstofverwijdering in relatie tot vulscenario en depotmanagement;
- vereiste externe (buiten het depot) technologische maatregelen ten behoeve van (aanvullende) biologische stikstofverwijdering;
- beschrijving van toepasbaarheid, rendementen en kosten van best uitvoerbare technologische maatregelen voor biologische stikstofverwijdering.

5.1.3 Recirculatie retourwater

Een beschrijving zal worden gegeven van de invloed van recirculatie van retourwater (voor gebruik als perswater) op de kwaliteit en kwantiteit van het te lozen retourwater en de biologische stikstofverwijdering in het bijzonder.

5.1.4 Depotmanagement

In deze paragraaf wordt een beschrijving gegeven van de technische mogelijkheden in het depotmanagement. Wat betreft de bedrijfsvoering van de inrichting zal achtereenvolgens aandacht worden besteed aan:

- mogelijke vulscenario's in relatie tot de eerder beschreven mogelijkheden voor biologische stikstofverwijdering;
- toe te passen jaarlijkse stortperiode(n) en -duur;
- toepassing van consolidatiebevorderende maatregelen;
- toepassing van maatregelen die de natuurlijke stikstofverwijdering bevorderen;
- bedrijfsvoering van zuiveringstechnische maatregelen buiten het depot met het oog op verwijdering van stikstof en zwevende stof uit het te lozen retourwater.

5.2 **Uitgangspunten**

In de navolgende paragrafen worden de uitgangspunten en randvoorwaarden vastgelegd op basis waarvan het onderzoek is uitgevoerd. De gegevens zijn met name afkomstig uit het MER Averijhaven | ref.4,8,9 | en uit de voor de Averijhaven afgegeven WVO-vergunning | ref.1 |. De waarden van een aantal parameters wijken echter af van die in het MER en de vergunning, aangezien het depotontwerp ten opzichte van de aangevraagde activiteit op details is gewijzigd (o.a. taludhelling).

5.2.1 Algemene uitgangspunten

Depotafmetingen

Natte oppervlakte bovenzijde inrichting:	11,5 ha
Inhoud inrichting:	1.950.000 m ³
Bruto beschikbaar stortvolume na uitbreiding:	1.500.000 m ³
Stortheogte:	- NAP + 15 m

Situatie bij aanvang stortperiode

Waterpeil:	NAP + 0,5 m
Niveau gestorte specie:	NAP - 2,0 m
Dikte schijf opstaand water:	2,5 m

Depot Averijhaven bevindt zich op bij aanvang van de vulfase in de bovenwaterfase, inhoudende dat op de huidige specie een waterschijf met een dikte van circa 2,5 m staat. In de WVO-vergunning | ref.1 | wordt voor de resterende vulfase van de inrichting uitgegaan van een peilbeheer waardoor een gemiddelde waterschijfdikte van 2 m wordt gehanteerd. In het onderzoek wordt voornamelijk uitgegaan van een continuering van de huidige situatie (zie ook § 3.3).

Karakteristieken van de specie in depot

In situ hoeveelheid te storten specie (afgerond):	1.450.000 m ³
Duur opvulfase (stortperiode):	12 jaar
Start opvulfase:	1996
Einde opvulfase:	2008
Hoeveelheid per jaar, V_j :	120.833 m ³



Kwaliteit:	zoet, zout, klasse 3 en 4
Dichtheid specie in situ:	1.375 kg/m ³
Dichtheid specie na baggeren:	1.350 kg/m ³
Stortdichtheid:	1.200 kg/m ³
Uitleveringsfactor, $F_{v,u}$:	1,99
Sedimentatiedichtheid (dichtheid bij aanvang consolidatie):	1.250 kg/m ³
Sedimentatiefactor, $F_{v,s}$:	0,78
Volumetoename door gasvorming:	10%
Einddichtheid na consolidatie en gasvorming:	1.360 kg/m ³
Consolidatiefactor tot einde vulfase, $F_{v,c}$:	0,78
Dichtheid water:	1.024 kg/m ³
Depotfactor, $F_{v,d}$:	1,04

Conform het MER | ref.4 | is een depotfactor (zie ook voetnoot pag. 9) gehanteerd van:

$$F_{v,d} = (1.390 - 1.024) / (1.375 - 1.024) = 1,04$$

Perswaterbehoefte

Conform het MER is er in dit onderzoek expliciet uitgegaan van een uitleveringsfactor van 1,99. Dit betekent dat er per m³ in situ specie gemiddeld slechts 0,85 m³ perswater wordt toegevoegd. Deze perswaterbehoefte is berekend uit het verschil van stortvolume van de specie (1,99 x in situ volume) en het specievolume na baggeren (1,08 x in situ volume), zijnde (1,99/1,08 - 1) m³ per m³ in situ specie. Deze geringe hoeveelheid perswater per m³ specie kan alleen worden gerealiseerd bij het storten van 'geknepen' specie vanuit beunbakken. In het geval er met sleepopperzuigers wordt gebaggerd en de lading batchgewijs naar het depot wordt gebracht en gestort, kan het stortvolume een veelvoud zijn van het in situ volume van de specie. Dit is tijdens het storten van de 50.000 m³ specie in augustus 1995 gebleken. Het stortvolume bedroeg toen circa 200.000 m³.

Peilbeheer/bedrijfsvoering

Uitgangspunt is dat gedurende de stortfase een peilbeheer wordt gevoerd waarbij op de gestorte specie een waterschijfdikte van 1 of 2 meter wordt gehandhaafd ('constante schijf'-scenario). Dit houdt in dat bij een verwachte waterschijfdikte van 2,5 m eerst zolang recirculatie van opstaand water voor het verpompen van de nieuw te storten specie dient te worden toegepast totdat een waterschijfdikte van respectievelijk 1 m en 2 m is bereikt.

Daarnaast zal worden nagegaan wat het effect is op de kwaliteit en kwantiteit van het te lozen retourwater bij een waterschijf met variabele dikte ('maximum volume'-scenario).

5.2.2 Debieten

Sedimentatiewater, Q_s

$$Q_s = V_j * F_{v,u} * (1 - F_{v,s}) = 120.833 * 1,99 * 0,22 = 52.900 \text{ m}^3 \text{ per jaar} \\ \approx 145 \text{ m}^3 \text{ per dag}$$



Neerslagoverschot
overeenkomend met een neerslagdebiet Q_n van
 $Q_n = 0,1 * 115.000 =$

100 mm per jaar

11.500 m³ per jaar
≈ 31,5 m³ per dag

Consolidatiewater, $Q_{c,op}$
gemiddeld bij $Q_{c,op} = \frac{2}{3}$ van totale $Q_{consolidatie}$

30.700 m³ jaar
≈ 84 m³ per dag

Totaal retourwaterdebiet, Q_{retour}

circa 95.000 m³ per jaar
≈ 260 m³ per dag

Deze waarde van het retourwaterdebiet geeft aan dat recirculatie van retourwater net niet voorziet in de perswaterbehoefte van 0,85 m³ per m³ in situ specie, overeenkomend met circa 103.000 m³ perswater per jaar (zie ook § 5.2.1).

5.2.3 Concentraties en vrachten aan ammonium-stikstof

Storten/sedimentatie

Uitgangspunt is dat tijdens het storten van de baggerspecie de in de waterfase van deze specie aanwezige ammonium-stikstof kwantitatief in het opstaande water terecht komt. Daartoe is een virtueel NH_4^+ -N gehalte in het sedimentatiewater vastgesteld op basis van een NH_4^+ -N gehalte van 60 g N per m³ gestorte specie. Deze virtuele waarde is in de praktijk niet meetbaar, immers op het moment van storten vindt instantaan menging plaats van het vrijkomende sedimentatiewater van de specie met het opstaande water.

Dit virtuele NH_4^+ -N gehalte is nu berekend door de totale hoeveelheid NH_4^+ -N die per m³ stortvolume in het depot wordt gebracht (60 g) te delen door de uit deze hoeveelheid vrijkomend sedimentatiewater, zijnde $(1 - F_{v,s}) * 1 = 0,22$ m³. De virtuele concentratie wordt derhalve $60/0,22 = 272$ mg NH_4^+ -N per liter.

Indien deze waarde wordt gebruikt voor de berekening van de toename van het NH_4^+ -N gehalte in het opstaande water als gevolg van de in augustus 1995 gestorte hoeveelheid van 50.000 m³ in situ specie, dan blijkt dit redelijk overeen te komen met de analyseresultaten van het opstaande water na het storten.

NH_4^+ -N gehalte in de gestorte specie	60 mg N/l
Virtueel NH_4^+ -N gehalte in het sedimentatiewater	272 mg N/l

Gemiddelde vracht $(60/1000 * 120.833 * 1.99)/1000$ ≈ 39,5 kg N/dag

Consolidatie

NH_4^+ -N concentratie in poriën- c.q. consolidatiewater	120 mg/l
Gemiddelde vracht, 84 m ³ /dag * 120 g/m ³ =	≈ 10 kg/dag

*Afbraak*

De hoeveelheid NH_4^+ -N als gevolg van afbraak van organische stof in de gestorte specie is relatief gering. Voor afleiding zie § 6.3.2.

Bijdrage aan NH_4^+ -N vracht door afbraak

circa 1,6 kg N/dag

Depositie

Ook de hoeveelheid NH_4^+ -N die met neerslag wordt aangevoerd is gering (zie ook § 6.3.2). In het onderzoek is uitgegaan van

Gemiddelde NH_4^+ -N vracht via depositie

circa 1 kg N/dag

Totale vracht

De aldus berekend gemiddelde totale vracht aan NH_4^+ -N die aan het opstaande water wordt toegevoegd bedraagt $39,5 + 10 + 1,6 + 1 \approx 52$ kg N per dag.

6. RESULTATEN BIOLOGISCHE STIKSTOFVERWIJDERING

6.1 Inleiding

Voor de verwijdering van stikstof uit het retourwater is het van belang inzicht te hebben in de processen die een rol spelen of kunnen spelen bij de reacties die stikstofverbindingen kunnen ondergaan. Allereerst zullen de relevante processen in beschouwing worden genomen. De uitgangspunten voor de berekeningen worden vervolgens behandeld, waarna berekend wordt of het zin heeft een installatie voor nitrificatie van het water op te nemen. Overige technologische ingrepen komen daarna aan de orde.

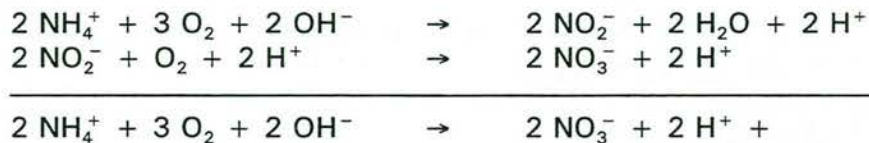
6.2 Relevante processen

Voor beschouwing van de verwijdering van stikstof zijn allereerst de reacties die stikstofverbindingen kunnen ondergaan van belang.

6.2.1 Stikstof

Nitrificatie

Nitrificatie is het biologische proces waarbij ammonium-stikstof eerst in nitriet en vervolgens in nitraat wordt omgezet.



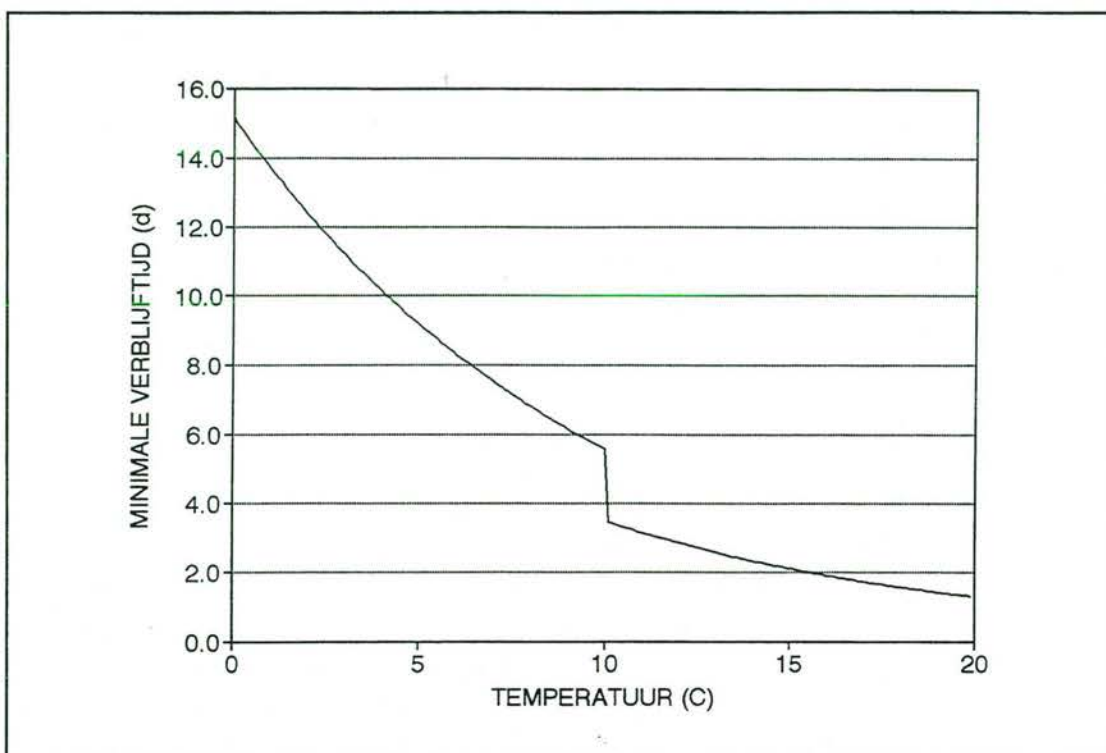
De beide nitrificatiereacties, die door verschillende typen bacteriën worden uitgevoerd, worden doorgaans gezamenlijk in beschouwing genomen. Nitriet treedt alleen in zeldzame gevallen, tijdens de exponentiële groeifase en bij hoge concentraties ammonium-stikstof, als tussenprodukt op. Dit wordt veroorzaakt doordat de nitrietvormers een beduidend hogere groeisnelheid hebben dan de nitraatvormers [ref.10] .

In het algemeen wordt de groeisnelheid van bacteriën geacht een hyperbolische functie van de substraatconcentratie te zijn:

$$\mu = \mu_{\text{MAX}} \times S / (S + K_s) - b$$

waarin μ is de groeisnelheid, μ_{MAX} is de maximale groeisnelheid, S is de substraatconcentratie en K_s is de verzadigingsconstante voor het substraat, en b is de afstervingsnelheid. μ_{MAX} is een sterke functie van de temperatuur.

De groeisnelheid van nitrificerende bacteriën is berekend op een wijze, afgeleid van het Duitse model ARABER. In bijlage 1 wordt hierop nader ingegaan. Op basis van de berekende groeisnelheden is de minimale verblijftijd vastgesteld. De minimale verblijftijd om de nitrificerende bacteriën in het systeem te houden is in figuur 6.1 weergegeven bij watertemperaturen van 0°C tot 20 °C.



Figuur 6.1. Minimale verblijftijd (= de reciproke van de groeisnelheid) in een volledig gemengd systeem voor nitrificatie.

Bij een watertemperatuur van 5°C dient volgens deze berekening een verblijftijd te worden aangehouden van circa 9,2 dagen. Volgens de literatuur kan een dergelijke groeiformule slechts met uiterste voorzichtigheid worden gebruikt. Vaak wordt aangegeven dat de formule beneden 10°C niet meer geldig is. Ook worden bij lagere temperaturen wel aangepaste waarden voor de temperatuur-factor gegeven: bijvoorbeeld:

- $\theta_N = 1.02$ voor $7^\circ\text{C} < T < 15^\circ\text{C}$
- $\theta_N = 1.40$ voor $2^\circ\text{C} < T < 7^\circ\text{C}$ | ref.11 |

Hoewel er vaak van wordt uitgegaan dat onder alle temperaturen dezelfde of sterk verwante nitrificerende bacteriën een rol spelen | ref.12 |, is het bestaan van nitrificeerders met een laag temperatuur-optimum al betrekkelijk lang geleden aangetoond | ref.13 |. Het is dus aannemelijk dat uitspraken over het ontbreken van activiteit van nitrificerende bacteriën bij temperaturen lager dan 10°C betrekking hebben op niet-aangepaste populaties.

Computermodellen voor de beschrijving van gebeurtenissen in oppervlaktewater (Duflow, MK2, Orpheus) gaan uit van een eerste-orde kinetiek met betrekking tot de nitrificatie zowel als de denitrificatie. Deze methodiek wordt kennelijk algemeen gehanteerd, maar deze is alleen van toepassing bij concentraties van minder dan circa 0,3 mg $\text{NH}_4^+\text{-N/l}$. Er is weinig reden om aan te nemen dat de nitrificatie via een eerste-orde reactie plaats zou vinden. De substraat-verzadigingsconstante is laag in vergelijking met de te verwachten concentraties. Bij voldoende verblijftijd (zie boven) is het aannemelijk dat de zuurstofinbreng en de competitie tussen zuurstofverbruik voor aërobe afbraak van CZV en nitrificatie bepalend zijn voor het verloop van de nitrificatieprocessen.



Nitrificerende bacteriën zijn betrekkelijk gevoelig voor licht | ref.14 | , maar het is aannemelijk dat de lichthoeveelheden bij een watertemperatuur van 5°C niet of nauwelijks nadelige effecten hebben. 's Zomers is er mogelijk sprake van remming van de groei van nitrificeerders door licht, maar de groeisnelheid is dan veel hoger. De netto groeisnelheid (het resultaat van groei en remming) zal altijd een kortere verblijftijd opleveren dan die in de winter vereist is.

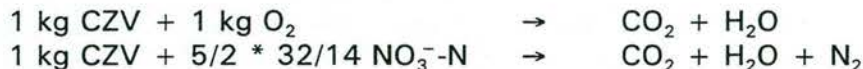
Nitrificerende bacteriën zijn ook gevoelig voor begrazing door ééncelligen | ref.15 | . Het effect van de begrazing, dat aanzienlijk kan zijn, is echter in de verdere beschouwingen niet opgenomen. Er is ervan uitgegaan dat eerst een aanzienlijke populatie nitrificeerders aanwezig dient te zijn voordat begrazing überhaupt een rol kan gaan spelen.

Denitrificatie

Denitrificatie is het biologische proces waarbij nitraat (of nitriet) wordt gebruikt als elektronenacceptor (in plaats van zuurstof bij aërobe omzettingen) bij de omzetting van organische stof.



tegelijkertijd met N_2 worden kleine hoeveelheden lachgas N_2O gevormd. CZV is – per definitie – equivalent met zuurstof:



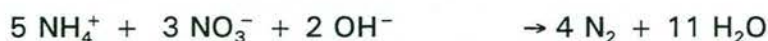
voor de oxydatie van 1 kg CZV is 2,86 kg nitraat nodig.

Autotrofe denitrificatie

Twee denitrificatieprocessen waarbij niet CZV, maar een anorganische verbinding als energieleverancier betrokken is kunnen een rol spelen. Allereerst denitrificatie met zwavel als energiebron, dat de basis is van het zwavel-kalksteen-proces:



en ten tweede de denitrificatie met ammonium-stikstof als energiebron:



Deze reactie koppelt nitrificatie aan denitrificatie; het bestaan ervan is aangetoond, maar de technologische toepasbaarheid ervan nog niet | ref.16 | . De bacteriën groeien bijzonder langzaam. Of de reactie ook in sediment c.q. baggerspecie kan optreden is onbekend.

6.2.2 Zuurstof

Zuurstof welke nodig is voor de nitrificatie, treedt via diffusie het water binnen, of wordt door algen tijdens fotosynthetische processen gevormd. Zuurstof wordt weer opgebruikt tijdens de respiratie van algen en tijdens de aërobe oxydatie van organisch materiaal, waaronder die van fermentatieprodukten, methaan en

waterstofgas die ontsnappen tijdens anaërobe afbraakprocessen in de specielaag.

De reaëratiesnelheid, dat wil zeggen de snelheid waarmee zuurstof vanuit de lucht diffundeert in het water, kan beschreven worden met

$$dD = -K_A \times D$$

waarin

R = reaëratiesnelheid ($\text{g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$);

K_A = reaëratie-constante, afhankelijk van windsnelheid, zoutgehalte *etcetera*;

D = zuurstofdeficiet $D = C_s - C$, met C_s is verzadigingsconcentratie en C is concentratie (mg/l);

De reaëratie-constante voor stilstaande wateren een functie van de windsnelheid U_w (m/s) | ref.10,17 | :

$$K_A = 0,782 \sqrt{U_w} - 0,317 U_w + 0,0372 U_w^2$$

Met behulp van gegevens met betrekking tot de windsnelheid kan dus de reaëratie-constante dagelijks worden berekend.

6.2.3 CZV

Voor de heterotrofe denitrificatie is organisch materiaal (CZV) nodig dat in de gestorte specie aanwezig is, maar waarvan slechts een gering deel in het water terecht komt. In de gestorte specie vindt anaërobe afbraak plaats met als voornaamste eindprodukten methaan en CO_2 . Tussentijds ophopende fermentatieprodukten (met name vluchtige vetzuren als azijnzuur en propionzuur) kunnen beschikbaar komen, maar de hoeveelheden zijn laag.

6.2.4 Algengroei

In de aanvoer van CZV voor de denitrificatie zou de respiratie en afsterving van algen voor een belangrijke bijdrage kunnen zorgen. Algengroei kan gemodelleerd worden volgens de volgende formule | ref.18 | , welke is ontleend aan | ref.19 | .

$$Y_A = E_M I_0 K (1 - e^{-acD}) - R_A cD_w,$$

waarin

Y_A = de opbrengst ($\text{g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$);

E_M = lichtconversie, gesteld op 1 %;

I_0 = lichtintensiteit (W/m^2);

c = concentratie algen (g/l);

R_A = respiratie-coëfficiënt ($0.142 \times T \times 0.05$);

D = waterdiepte (cm)

Door voor verschillende temperaturen en lichthoeveelheden de evenwichts-algenconcentratie te bepalen (dat is de concentratie waarbij de netto opbrengst nul is), kan een indruk worden verkregen van de hoeveelheid materiaal die door afsterving van de algen vrijkomt. In tabel 6.1 is een voorbeeld gegeven van een



berekening van respiratiesnelheden door algen.

Tabel 6.1. Respiratiesnelheden van algen als functie van het seizoen.

SEIZOEN	TEMPERATUUR (°C)	LICHT (W/m ²)	RESPIRATIE (g O ₂ /l.d)
Winter	4	25	0,010
Lente,herfst	8	110	0,042
Zomer	16	201	0,077

Gedurende de zomer kan de respiratie door algen aanzienlijk zijn. Algenconcentraties tot 40 mg/l kunnen gehaald worden en met hun hoge respiratiesnelheid daalt de zuurstofconcentratie 's nachts tot waarden nabij 0 mg/l. Aangezien denitrificatie alleen onder zuurstofloze condities optreedt, is een gevolg van deze hoge respiratiesnelheden een toename van de denitrificatie. Daarbij zullen algen bij hoge celconcentraties en onder langere anaërobe condities afsterven, waarbij aanzienlijke hoeveelheden CZV vrijkomen die als C-bron voor de denitrificatie kunnen dienen. Pas bij zeer lage nitraatconcentraties (circa 1 mg NO₃⁻-N/l) zal slechts onder langdurige anaërobe omstandigheden mogelijk stankvorming optreden. Voor deze indicatieve berekening zou de conclusie zijn dat tot 20 mg CZV/l/d = ± 10 mg CZV/l per nacht beschikbaar zouden kunnen zijn voor denitrificatie.

6.2.5 Watertemperatuur

Voor het schatten van het verloop van bacteriële processen is de temperatuur van doorslaggevende betekenis. De watertemperatuur is niet bekend, maar kan geschat worden door het opstellen van een warmtebalans. Voor de warmtebalans is de beschrijving van Thomann & Mueller aangehouden | ref.20 |. De warmtebalans is in bijlage 1 nader gedetailleerd.

Met behulp van deze balans kan de watertemperatuur in een depot geschat worden als de diepte bekend is, met behulp van:

- gegevens over de stralingsenergie, welke via het KNMI verkregen kunnen worden; voor de berekeningen is de stralingsenergie te Eelde over 1990 gebruikt | ref.18 |;
- gegevens over de luchttemperatuur, waarvoor is uitgegaan van een gesynthetiseerd verloop, opgesteld aan de hand van de 30-jaar gemiddelden over 1940 - 1970 | ref.21 |;
- gegevens over de windsnelheid, waarbij is uitgegaan van de frequentieverdeling van de windsnelheid zoals is gegeven in het MER-rapport | ref.9 |.

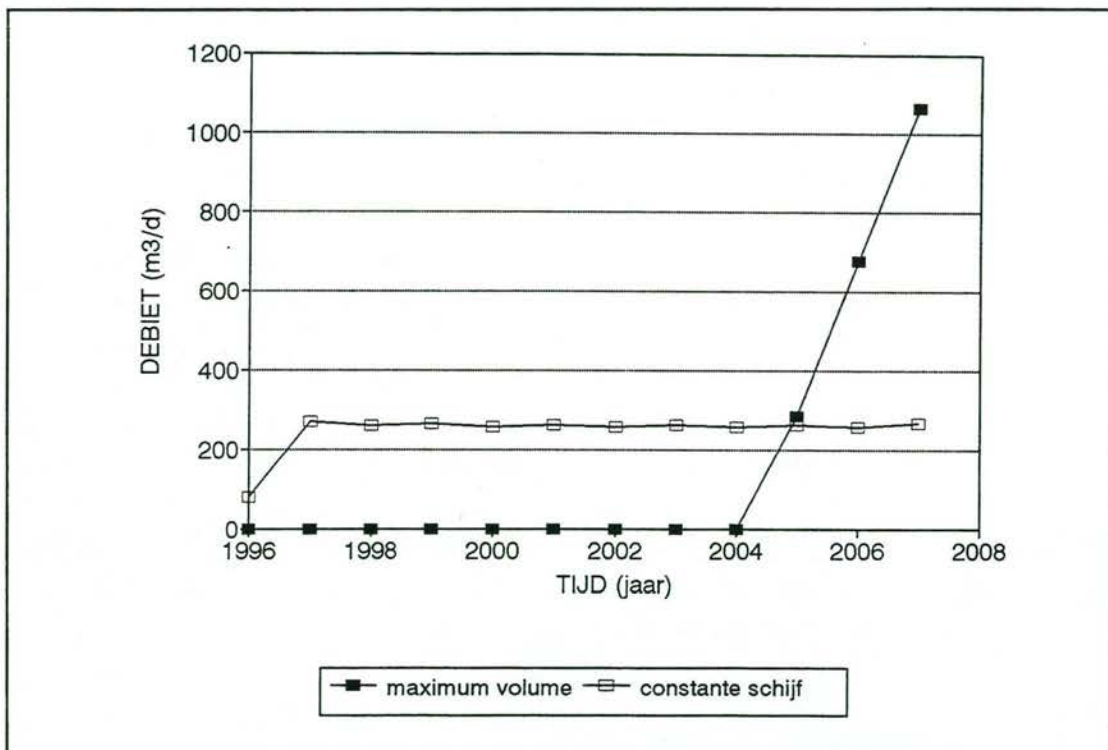
6.3 **Uitgangspunten**

6.3.1 Waterhoeveelheden

Er zijn twee uiterste scenario's te onderscheiden voor het beheer van de waterhoeveelheden in het depot. De eerste gaat uit van een waterschijf met vaste dikte, en de tweede gaat uit van een maximaal watervolume in het depot (zie § 4.2). In het vervolg zullen telkens beide scenario's in beschouwing worden

genomen. In figuur 6.2 zijn de debieten van het te lozen retourwater bij beide scenario's weergegeven. Hierbij wordt geen recirculatie van retourwater toegepast.

Bij de berekeningen voor figuur 6.2 is uitgegaan van een van te voren vaststaande dikte van de waterschijf van 2,5 m bij aanvang van de stortperiode. Deze initiële dikte van de waterschijf heeft geen invloed op de hoeveelheid te lozen retourwater, echter wel op het tijdstip waarop geloosd dient te gaan worden.



Figuur 6.2. Te behandelen waterhoeveelheden bij verschillende scenario's.

Uit figuur 6.2 wordt duidelijk, dat bij het aanhouden van een maximaal watervolume in het depot lozing van retourwater pas veel later zal aanvangen. Het gevolg is wel dat de te behandelen hoeveelheden water dan groter zullen zijn.

In geval van het aanhouden van een maximaal watervolume is de dikte van de waterschijf variabel. Deze bereikt een maximum om daarna weer af te nemen, als gevolg van uitlevering van de gestorte specie. In figuur 6.3 is de waterschijfdikte gegeven als functie van de tijd.

Het hanteren van de beide scenario's heeft gevolgen voor de berekening van de nitrificatie, zoals verderop zal worden behandeld.

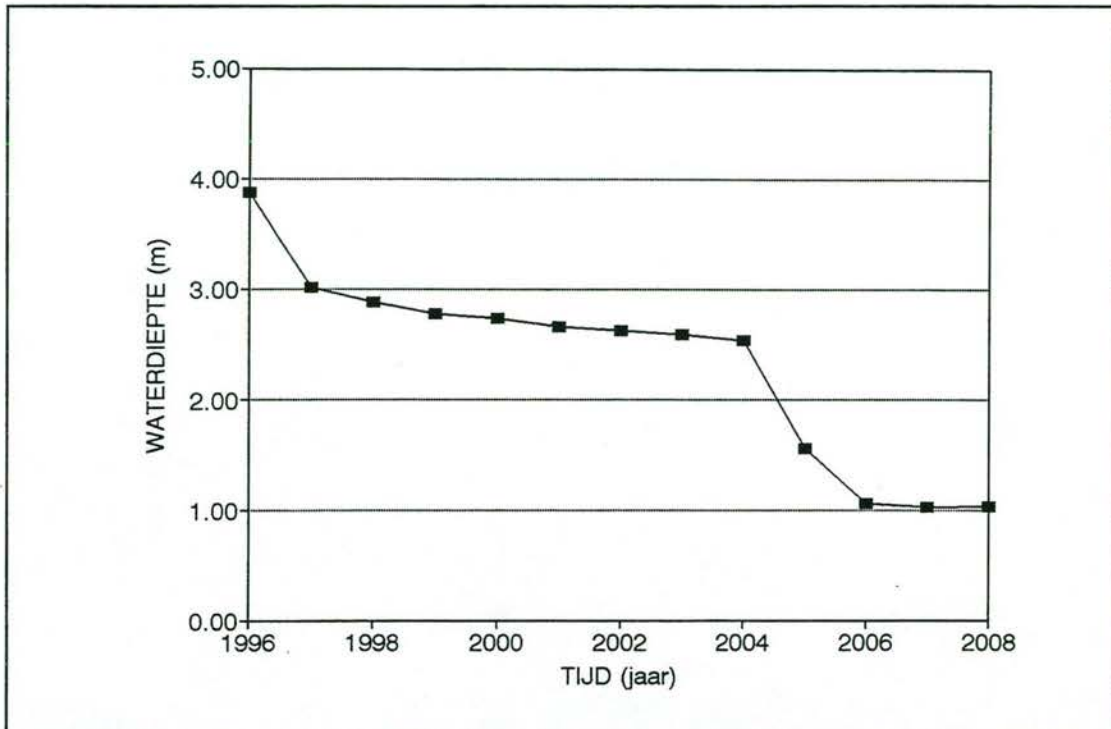
6.3.2 Belasting met $\text{NH}_4^+\text{-N}$

Bij de berekening van de belasting met stikstof is uitgegaan van (zie ook uitgangspunten in § 5.2.3):

- een virtueel gehalte aan NH_4^+ in het sedimentatiewater van 272 mg N/l;
- een concentratie aan NH_4^+ in het poriënwater van 120 mg N/l.

Voor de berekening van de vrijkomende $\text{NH}_4^+\text{-N}$ -vrachten is uitgegaan van de volgende veronderstellingen (zie ook § 5.2.3):

- tijdens het storten wordt de waterfase van de gestorte specie direct gemengd met het opstaande water; aangezien het volume opstaand water zeer veel groter



Figuur 6.3. Diepte van de waterschijf als functie van de tijd bij het aanhouden van een maximaal volume in het baggerdepot.

is dan de hoeveelheid gestorte specie in de tijd kan ervan worden uitgegaan dat de stikstof in het sedimentatiewater kwantitatief naar het opstaande water gaat;

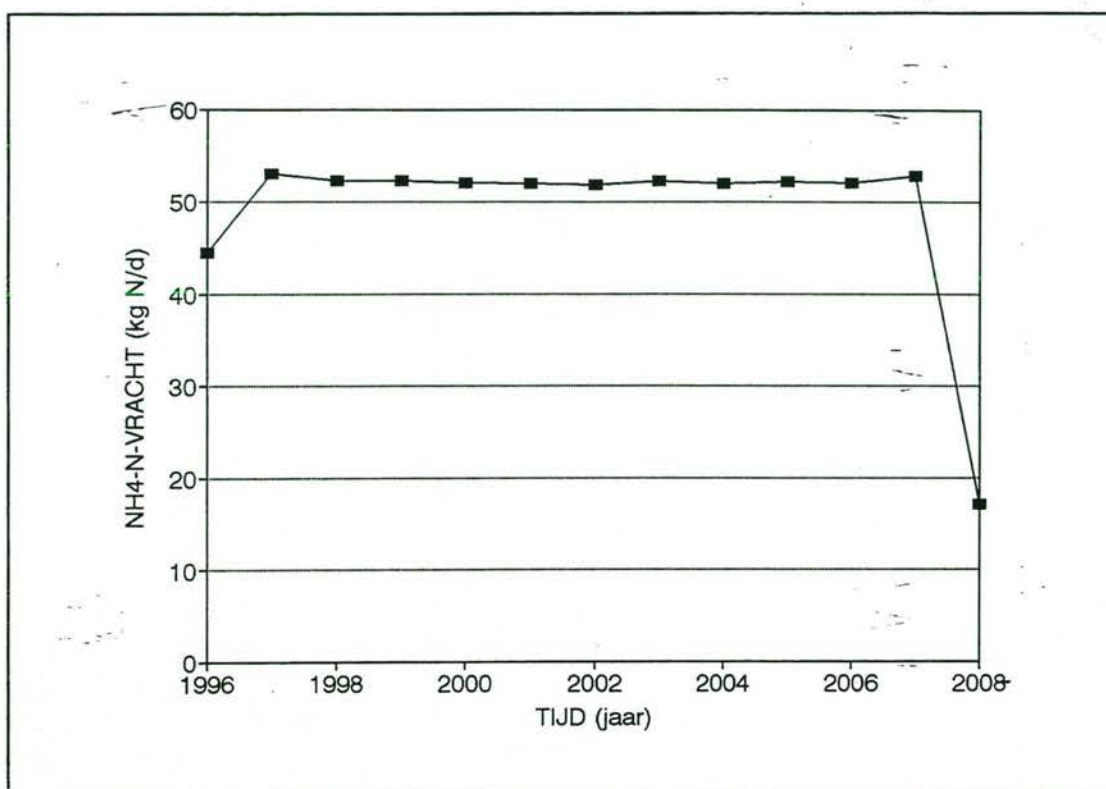
- de concentratie aan NH_4^+ in het vrijkomende consolidatiewater is gelijk aan dat in het poriënwater van de gestorte specie: 120 mg/l.

Bij deze berekening wordt nog geen rekening gehouden met de hoeveelheid stikstof (organisch N en $\text{NH}_4^+\text{-N}$) die vrijkomt als gevolg van afbraakprocessen van de organische stof in de in het depot aanwezige specie. Deze is gering: als wordt uitgegaan van een gemiddelde methaanproductie van $5 \mu\text{l CH}_4/\text{l specie}$ (zie § 6.5.2), dan komt dit neer op de omzetting van maximaal circa $9.500 \text{ l CH}_4/\text{d} \equiv 27,1 \text{ kg CZV}$. Bij een N-gehalte van 6 % in de organische stof, en een CZV van organische stof van 1,4 g/g, komt dit neer op circa 1,6 kg N/dag. Dit is maximaal slechts 3% van de verwachte totale N-vracht.

Ook de hoeveelheid $\text{NH}_4^+\text{-N}$ die met neerslag wordt aangevoerd kan worden verwaarloosd: deze bedraagt onder ongunstige omstandigheden maximaal $50 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{jaar}^{-1}$ | ref.29 |, hetgeen overeenkomt met circa $1,6 \text{ kg N/dag} \cdot \text{d}^{-1}$.

Het mag duidelijk zijn dat, bij de onnauwkeurigheid die de schattingen voor de dagelijkse N-vracht naar het opstaande water in het depot met zich meebrengen, mobilisatie van stikstof uit de specie en depositie van stikstof met de neerslag geen significante bijdrage hebben. Bij de verdere berekeningen is bij de dagelijkse

vracht aan $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 2,6 kg/d opgeteld voor de som van mobilisatie uit het specie en de depositie. De op deze manier berekende $\text{NH}_4^+\text{-N}$ -vracht is weergegeven in figuur 6.4. Voor de verschillende scenario's levert dit de uitgangspunten op als samengevat in tabel 6.2.

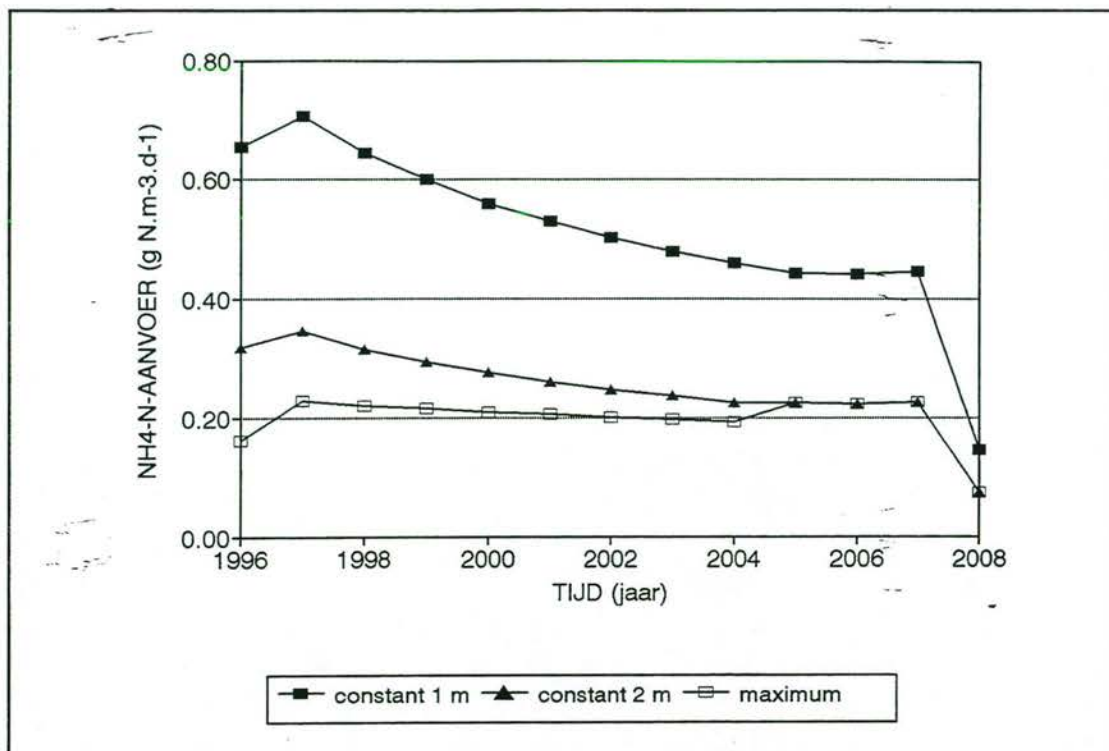
Figuur 6.4. Geschatte dagelijkse vracht aan $\text{NH}_4^+\text{-N}$.

Tabel 6.2: Samenvatting van de uitgangspunten voor de verschillende scenario's.

JAAR	VRACHT $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (kg/dag)	CONSTANTE SCHIJFDIKTE		MAXIMUM VOLUME	
		schijf 1 m	schijf 2 m		
		water- volume (m^3)	water- volume (m^3)	water- volume (m^3)	water- diepte (m)
1995 ¹	4,3	61.000	125.000	155.000	2,50
1996	44,5	68.000	140.000	275.000	3,88
1997	53,0	75.000	153.000	232.000	3,02
1998	52,2	81.000	166.000	238.000	2,88
1999	52,3	87.000	178.000	243.000	2,77
2000	52,1	93.000	189.000	249.000	2,73
2001	52,0	98.000	200.000	253.000	2,66
2002	51,9	103.000	211.000	259.000	2,63
2003	52,2	109.000	221.000	264.000	2,59
2004	51,9	113.000	231.000	269.000	2,54
2005	52,2	118.000	232.000	169.000	1,55
2006	52,1	118.000	232.000	118.000	1,05
2007	52,8	118.000	232.000	118.000	1,03
2008	17,1	118.000	232.000	118.000	1,03

1) berekende waarden bij aanvang stortperiode met specieniveau op NAP -2m en waterpeil op NAP +0,5m (zie ook § 3.3 en § 4.1)

De uit de gegevens van tabel 6.2 berekende hoeveelheid $\text{NH}_4^+\text{-N}$ die per dag naar het opstaande water wordt aangevoerd, is gegeven in figuur 6.5.



Figuur 6.5. Aangevoerde hoeveelheid $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (in $\text{g.m}^{-3}.\text{d}^{-1}$) naar het opstaande water voor de verschillende scenario's.

6.4 Natuurlijke of technologische nitrificatie

Voor de nitrificatie zijn de volgende mogelijkheden aan de orde:

Natuurlijk nitrificatie

Hierbij wordt uitgegaan van natuurlijke nitrificatie waarbij de verblijftijd en de zuurstofvoorziening voldoende zijn; er zijn dus geen extra voorzieningen nodig.

Technologische nitrificatie

Mochten de natuurlijke omstandigheden een goede nitrificatie niet kunnen garanderen, dan dient te worden omgekeken naar extern toe te passen technologische nitrificerende biologische systemen. Hiervoor zijn van belang:

- alleen extra beluchting is nodig; de verblijftijd garandeert dan voldoende omzetting;
- conventionele actiefslibsystemen voor nitrificatie;
- biorotoren;
- beluchte zandfilters.

Voor de nitrificatie dient allereerst de vraag te worden beantwoord óf technologische voorzieningen benodigd zijn, voordat de vraag aan de orde is welke dat dan wel kunnen zijn.

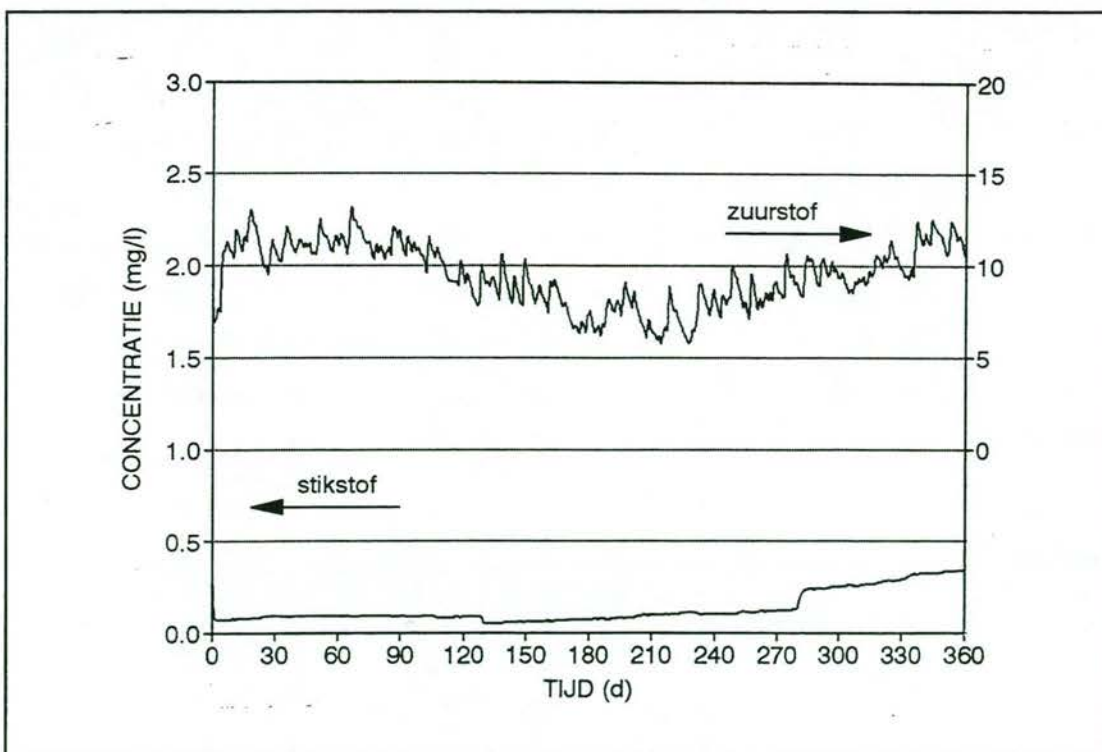
6.4.1 Simulatie van de natuurlijke nitrificatie

Om te kunnen beoordelen of het plaatsen van een aanvullende externe zuiveringsinstallatie noodzakelijk is, is een aantal simulaties uitgevoerd van de te verwachten natuurlijke nitrificatie. Daarbij is het verloop in het $\text{NH}_4^+\text{-N}$ gehalte in de tijd vastgesteld in de minimale hoeveelheid opstaand water, met andere woorden bij een waterschijfdikte van 1 m (zie tabel 6.2). Deze situatie kan immers als "worst-case" ten aanzien van de te verwachten $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentraties worden gezien in het geval geen recirculatie van retourwater wordt toegepast.

Bij de simulatie is de watertemperatuur van doorslaggevende betekenis. Er is er bij de simulatie van uitgegaan dat de temperatuur van het water beschreven kan worden door het opstellen van warmtebalans als beschreven in Thomann & Mueller | ref.17 |. Voor luchttemperatuur, zonnestraling en windsnelheid zijn verschillende gegevens gebruikt, waarvan aangenomen kan worden dat deze redelijke overeenstemming met de realiteit hebben. Voor de nitrificatie is een groei-model aangehouden, waarbij de zuurstofconcentratie is betrokken (zie § 6.2.1).

In de simulatie is ook de consumptie van BZV betrokken omdat deze invloed heeft op het zuurstofgehalte. De opzet van de simulatie wordt verder toegelicht in bijlage 1.

In figuur 6.6 is het resultaat van een van de uitgevoerde simulaties weergegeven.



Figuur 6.6. Resultaat van een simulatie van het verloop van het gehalte aan $\text{NH}_4^+\text{-N}$ en zuurstof gedurende een jaar bij maximum volume (dikte waterschijf = 4 m en BZV-vracht = 10 kg BZV/dag). De zuurstofconcentratie is op de rechter Y-as weergegeven.



De belangrijkste conclusies uit de uitkomsten van de simulaties zijn:

- Bij een belasting van 50 kg $\text{NH}_4^+\text{-N/d}$ is de capaciteit van de natuurlijke nitrificatie zowel bij een schijfdikte van 4 m (bij maximaal volume) en bij 1 m (constante waterschijf) groot genoeg om de aangevoerde vracht om te zetten in nitraat;
- Onder de meest ongunstige condities (zeer lage watertemperatuur, zeer lage activiteit bij aanvang) duurt het ongeveer drie maanden voordat de nitrificatie volledig op gang is gekomen; onder deze conditie kan het zuurstofgehalte van het water tijdens het op gang komen van de nitrificatie waarden lager dan 4,0 mg/l aannemen; dit is echter van zeer tijdelijke aard.
- Volgens de simulatie zou gedurende de eerste jaren een vracht van 100 kg $\text{NH}_4^+\text{-N/d}$ nog juist behandeld kunnen worden; bij hogere vrachten zouden, met name in de zomer, ernstige problemen met het zuurstofgehalte van het water op kunnen treden;
- Ook bij het storten van de gemiddelde jaarlijkse hoeveelheid specie in een tijdsbestek van vier maanden lijken zich geen problemen voor te doen; wel wordt het zuurstofgehalte gedurende enige tijd zeer laag.

Samenvattend kan geconcludeerd worden dat het niet aannemelijk is dat een externe installatie voor nitrificatie van het retourwater benodigd is. Geadviseerd wordt om geen technologische maatregelen voor het realiseren van nitrificatie te nemen.

6.4.2 Technologische nitrificatie

Mocht er behoefte zijn aan een grote bedrijfszekerheid, dan dient overgestapt te worden naar een technologische oplossing van de nitrificatie. Er kan ervan worden uitgegaan dat het toepassen van alléén extra beluchting geen zin heeft. In het depot zou het effect van beluchting veel te lokaal zijn om enige invloed te hebben. Om een minimale verblijftijd van het nitrificerende slib te garanderen dient een zo groot areaal van het depot belucht te worden dat de kosten daarvan niet in verhouding staan met externe technologische nitrificatie.

Voor het realiseren van nitrificatie in een installatie zijn er drie alternatieven: een actiefslibinstallatie, een biorotor-installatie, of een belucht zandfilter.

- Voor een actiefslibstelsysteem kan worden uitgegaan van een slibleeftijd van 17,5 dagen bij 4 °C. Bij een slibgehalte van 2,5 g/l en een zwevend stofgehalte van 50 mg/l in het influent dient te worden uitgegaan van een aëratieruimte van 500 m³. Er zou een nabezinker met oppervlak 196 m² (diameter 15,8 m) benodigd zijn.
- Voor een biorotor-installatie kan worden uitgegaan van een nitrificatiesnelheid bij 4°C van circa 0,7 g N.m⁻².d⁻¹, overeenkomend met circa 1,5 g N.m⁻².d⁻¹ bij 10°C, en een oppervlak van circa 225 m²/m³ | ref.22 |. Voor het verwijderen van 50 kg $\text{NH}_4^+\text{-N}$ per dag zou een biorotor-installatie met een volume van 320 m³ benodigd zijn.
- Voor een biofilter-installatie mag worden uitgegaan van een nitrificatiecapaciteit van 0,5 kg N.m⁻².d⁻¹, zodat voor een vracht van 50 kg $\text{NH}_4^+\text{-N}$ per dag een filterinstallatie met een oppervlak van 100 m² zou volstaan.

Globale dimensies en de investeringsbedragen zijn samengevat in tabel 6.3.

Het energieverbruik voor een biorotor is aanzienlijk geringer dan dat van een actiefslibinstallatie, waarvan het energieverbruik weer aanzienlijk geringer is dan van een belucht zandfilter.



Tabel 3. Dimensies van installaties voor biologische nitrificatie.

INSTALLATIE	DIMENSIONERING	DIMENSIES	INVESTERING ¹
Actief-slib	slibleeftijd 17,5 dagen nabezinking 0,7 m/h	aëratietank 500 m ³ nabezinking 196 m ²	f 1.710.000
Biorotor	N-belasting 0,7 g N.m ⁻² .d ⁻¹ oppervlak 225 m ² /m ³	rotor-oppervlak 71.000 m ² rotor-volume 320 m ³	f 1.420.000
Zandfilter	N-belasting 0,5 kg N.m ⁻² .d ⁻¹	filteroppervlak 100 m ²	f 2.500.000

1) prijzen zijn alleen bedoeld voor onderlinge vergelijking.

De keuze tussen de drie alternatieve typen installaties is eenvoudig: een biorotor zou het goedkoopste zijn, en bovendien verreweg het minste energieverbruik opleveren. De energiekosten voor een biorotor zouden circa f 2.000,--, voor een actiefslibstelsysteem circa f 9.000,-- en voor een zandfilter circa f 65.000,-- per jaar bedragen.

6.5 Denitrificatie

Voor de denitrificatie zijn de volgende alternatieven aan de orde:

- natuurlijke denitrificatie, waarbij het NO₃⁻ verwijderd wordt door denitrificatie in de toplaag van de specie, en mogelijk ook in het opstaande water;
- denitrificatie met behulp van CZV die met de specie wordt meegevoerd, en die mogelijk kan worden vrijgemaakt als CZV-bron door menging van de specie met NO₃⁻-bevattend water;
- denitrificatie met behulp van een toe te voegen afvalwaterstroom;
- denitrificatie met behulp van te verwerven CZV-bron.

De hoeveelheid CZV die beschikbaar dient te zijn voor de denitrificatie kan gesteld worden op:

$$3,0 \times [\text{NO}_3^- - \text{N}_{\text{IN}} + \text{N}_{\text{KJ}} - \text{N}_{\text{IN}} - (\text{Q}_{\text{RETOUR}} \times (\text{N}_{\text{EIS}} - 2))],$$

waarin

NO₃⁻-N_{IN} is de binnenkomende vracht aan nitraat-stikstof;

N_{KJ}-N_{IN} is de binnenkomende vracht aan Kjeldal-stikstof;

N_{EIS} is de eis aan het gehalte aan totaal-stikstof;

Q_{RETOUR} is het retourwaterdebiet.

Hierbij wordt uitgegaan van een CZV/NO₃⁻-N_{IN} verhouding van 3,0 voor een goede denitrificatie, en een maximaal gehalte aan N_{KJ}-N in het retourwater van 2,0 mg/l. Het is duidelijk dat de hoeveelheid benodigde CZV afhankelijk is van het retourwater-debiet. Afhankelijk van het retourwaterdebiet dient 70-90% van het nitraat gedenitrificeerd te worden, zodat circa 110 - 140 kg CZV/d benodigd is.

6.5.1 Natuurlijke denitrificatie

In de specie treedt afbraak op door anaërobe bacteriën. Het eindproduct van deze omzettingen is methaan en CO_2 . Tussenprodukten van deze omzettingen kunnen in aanwezigheid van nitraat, dat een sterke remmer van methaanvormende bacteriën is (door de te hoge redoxpotentiaal voor methaanvormende bacteriën), als CZV-bron voor de denitrificatie dienen. Zonder ingrepen zou alleen de toplaag van de specie, voorbij het punt waarop de zuurstofconcentratie lager dan circa 0,5 mg/l is, **gepenetreerd** kunnen worden door nitraat. Het zuurstofverbruik door de specie bedraagt circa 1 à 2 g $\text{O}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ bij 20°C | ref.17 | . Het zuurstofverbruik voldoet aan de volgende temperatuurafhankelijkheid:

$$Z = Z_{20} \times 1.065^{(T - 20)}$$

welke bij temperaturen lager dan 10°C niet meer geldt. Bij temperaturen lager dan 5°C neemt het zuurstofverbruik af tot vrijwel nul | ref.17 | . Ook voor denitrificerende bacteriën is overigens aangetoond dat deze lage temperatuuroptima kunnen hebben | ref.23 | . Het zuurstofverbruik door de specie is bijzonder veel hoger dan de denitrificatiesnelheid in de specie. Voor waterbodemsedimenten bedraagt de denitrificatiesnelheid slechts 7 tot 50 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ | ref.24,25 | . Bij het specieoppervlak van depot Averijhaven in 1996 zou slechts 3,4 kg $\text{NO}_3\text{-N}$ gedenitrificeerd worden.

Veel belangrijker voor de aanvoer van een koolstofbron voor denitrificerende bacteriën lijkt de algengroei te zijn. Het vrijkomen van CZV bij de afsterving van algen zou een belangrijke bijdrage leveren aan de natuurlijke denitrificatie: onder de meest ongunstige omstandigheden (1996, waterschijf 68.000 m^3) kan de concentratie gedurende een jaar oplopen tot circa 180 mg $\text{NO}_3\text{-N}$. Indien in slechts enkele (warme) nachten per jaar het zuurstofgehalte sterk daalt, en er hoge algen concentraties aanwezig zijn, dan is het aannemelijk dat door algenafsterving de nitraatconcentratie gedurende deze tijd enorm zal dalen (zie ook tabel 6.1). Er zijn echter teveel onzekerheden om tot een duidelijke uitspraak over het effect van de primaire produktie door algen op de beschikbaarheid van CZV voor de denitrificatie te komen.

Als algemene conclusie kan worden geformuleerd dat niet duidelijk is wat de bijdrage van de natuurlijke denitrificatie is aan de verwijdering van stikstof. Dit impliceert dat omgezien moet worden naar technologische opties om de denitrificatie te realiseren.

6.5.2 Technologische denitrificatie

Interne CZV-bron

De organische stof in specie wordt zeer langzaam afgebroken. Metingen in waterbodemsediment bij 27°C gaven een produktie te zien van 7,5 $\mu\text{l CH}_4 \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{dag}^{-1}$ voor nat sediment | ref.26 | hetgeen bij 5°C neerkomt op circa 1,6 $\mu\text{l CH}_4 \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{dag}^{-1} \equiv 5 \text{ mg CZV} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$. Bij een dergelijke lage omzettingssnelheid kan ervan worden uitgegaan dat er geen intermediaire produkten ophopen. Dit betekent dat er slechts maximaal 5 $\text{mg CZV} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ vrijkomt als mogelijk substraat voor denitrificatie, bij remming van de methaanproduktie door de aanwezigheid van nitraat.



Menging van het specie zou de hydrolysesnelheid kunnen bevorderen, maar zelfs als de hydrolysesnelheid (= de beschikbaarheidsstelling van substraat voor de nitrificerende bacteriën) met een factor tien verhoogd zou worden, dan is de hoeveelheid nitraat die gedenitrificeerd kan worden nog slechts circa $20 \text{ mg NO}_3^- \cdot \text{N} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$. Om de aangevoerde vracht nitraat te denitrificeren zou 10.000 m^3 specie min of meer in suspensie gehouden moeten worden.

In hoeverre eventueel hydrocycloneren van een deel van de te storten specie een slibfractie oplevert die specifiek kan worden aangewend als C-bron voor denitrificatie dient nader te worden onderzocht. Met name de wijze van behandelen van deze fractie om de CZV beschikbaar te maken verdient nader aandacht. Op laboratoriumschaal zou vastgesteld kunnen worden wat onder anaërobe condities het effect van langzaam mengen is op de concentratie van met name de lagere fermentatieproducten van de organische stof in de slibfractie.

Externe CZV-bron

Een en ander betekent dat alleen met een extern aangevoerde CZV-bron de denitrificatie gegarandeerd kan worden. Indien geen recirculatie van het retourwater wordt toegepast, dient circa $280 \text{ m}^3/\text{d}$ behandeld te worden. Deze zou maximaal een gehalte hebben van $\text{circa } 50/280 \cdot 1000 = 180 \text{ mg NO}_3^- \cdot \text{N}/\text{l}$. Bij een vracht van circa $50 \text{ kg N}/\text{d}$ en een benodigd rendement van 70-90% zou 110 tot 140 kg CZV toegevoegd dienen te worden.

Zelfs bij recirculatie van het retourwater, of bij maximalisatie van het watervolume in het depot (dat wil zeggen geen lozing van retourwater), kan het van belang zijn om een lager niveau voor het nitraatgehalte van het in het depot aanwezige water te handhaven. Bovendien kan door het optreden van nitrificatie de pH sterk dalen, waardoor dit proces wordt geremd. Hoe sterk de pH-daling kan zijn hangt onder meer af van het bufferend vermogen van het opstaande water c.q. de gestorte specie. Gewoonlijk is het pH-bufferend vermogen van baggerspecie door het relatief hoge carbonaatgehalte vrij groot | ref.30 |. Een eventuele pH-daling kan echter op eenvoudige wijze door toepassing van (externe) denitrificatie te niet worden gedaan.

Voorgesteld wordt een zandfilter, dat toch al nodig is om bij lozing van retourwater het aanwezige gehalte aan zwevende stof te reduceren tot $20 \text{ mg}/\text{l}$, in te zetten. Daarbij dient dosering van methanol, of eventueel een andere, om niet te verkrijgen CZV-bron, te worden toegepast voor het realiseren van de gewenste denitrificatie. Voor een denitrificerend filter kan een belasting van $0,5 \text{ kg N} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ worden aangehouden. Bij een filterbedhoogte van $2,5 \text{ m}$ zou 40 m^2 filteroppervlak benodigd zijn. De totale kosten (excl. BTW) van een dergelijk filter bedragen circa f 1.600.000,--. De jaarlijkse kosten van het toe te dienen methanol bedragen circa f 50.000,-- per jaar.

Bij de onderhavige nitraatgehalten dient een denitrificerend filter op de te behandelen vracht te worden gedimensioneerd | ref.27 |. Bij het scenario waarbij een maximaal volume wordt gehandhaafd, en waarbij als eenmaal met lozing is begonnen hogere debieten moeten worden behandeld, wordt het filter op dezelfde wijze gedimensioneerd.

6.6 Aanbevelingen voor onderzoek op pilot-schaal

Voor onderzoek op pilot-schaal naar te nemen zuiveringstechnische maatregelen bij depot Averijhaven worden de volgende aanbevelingen gedaan:

- onderzoek naar nitrificatie zou niet zozeer gericht dienen te worden op de groeisnelheid of activiteit van nitrificerende bacteriën, als wel op de zuurstofvoorziening, BZV-gehalten en alkaliteit, die de nitrificatie beïnvloeden;
- het is van groot belang inzicht te verkrijgen in het verloop van de natuurlijke denitrificatie. Vooral de invloed van algengroei en -concentraties zouden hierbij aandacht verdienen, maar ook de denitrificatie in de gestorte specie zelf, welke niet of nauwelijks is onderzocht in het concentratiegebied dat nu aan de orde is.
- onderzoek naar de mogelijke toepassing van de slibfractie van een deel van de te storten specie als C-bron voor denitrificatie verdient eveneens aanbeveling. Met name de wijze van behandelen van deze fractie om de CZV beschikbaar te maken verdient nader aandacht. Op laboratoriumschaal zou vooraf vastgesteld kunnen worden wat onder anaërobe condities het effect van langzaam mengen is op de concentratie van met name de lagere fermentatieproducten van de organische stof in de slibfractie.
- In het pilot onderzoek zou nagegaan moeten worden wat het effect op de biologische stikstofverwijdering is van sterke schommelingen in de saliniteit. Ook zou vastgesteld dienen te worden in hoeverre factoren die de nitrificatie en/of denitrificatie kunnen limiteren of remmen (aanwezigheid toxische componenten, fosfaattekort enz.) een rol (kunnen) spelen.

Het onderzoek zou met betrekking tot de nitrificatie moeten leiden tot het vaststellen van grenswaarden, waarboven het storten (binnen enige termijn) tijdelijk gestaakt zou dienen te worden. Voorlopig lijkt 3 à 5 mg NH_4^+ -N per liter een redelijke waarde, althans na de "opstart" zoals weergegeven bij de resultaten van de simulaties (zie bijlage 1).

Technologisch onderzoek op pilot-schaal zou vooral gericht dienen te zijn op te realiseren rendementen bij zeer lage temperaturen, waarbij aangetekend dient te worden dat hierbij zeer lange adaptatietijden in acht moeten worden genomen. Dit geldt voor zowel nitrificatie als denitrificatie.



7. RESULTATEN RECIRCULATIE RETOURWATER

In dit hoofdstuk wordt een beschrijving gegeven van de effecten van toepassing van recirculatie van retourwater voor het verpompen van de storten baggerspecie op de kwantiteit en de kwaliteit van het uiteindelijk te lozen retourwater.

7.1 Inleiding

Zoals in het vorige hoofdstuk is aangegeven is bij de simulatie van de biologische stikstofverwijdering uitgegaan van een "worst case" situatie ten aanzien van de NH_4^+ -N belasting naar het opstaand water van depot Averijhaven (zie § 6.4.1). Daartoe is het verloop in het NH_4^+ -N gehalte in de tijd vastgesteld in de minimale hoeveelheid opstaand water (waterschijfdikte van 1 m) zonder toepassing van recirculatie.

Uit de simulaties is naar voren gekomen dat zelfs in het geval van niet gelijkmatig storten van baggerspecie in de loop van het jaar in deze "worst case" benadering het NH_4^+ -N gehalte als gevolg van de natuurlijk nitrificatie tot beneden de vereiste jaargemiddelde concentratie van 15 mg N/l zal afnemen. Voor de navolgende denitrificatie zullen mogelijk, in aanvulling op de natuurlijke denitrificatie, technologische externe maatregelen getroffen dienen te worden om aan voornoemde eis te voldoen.

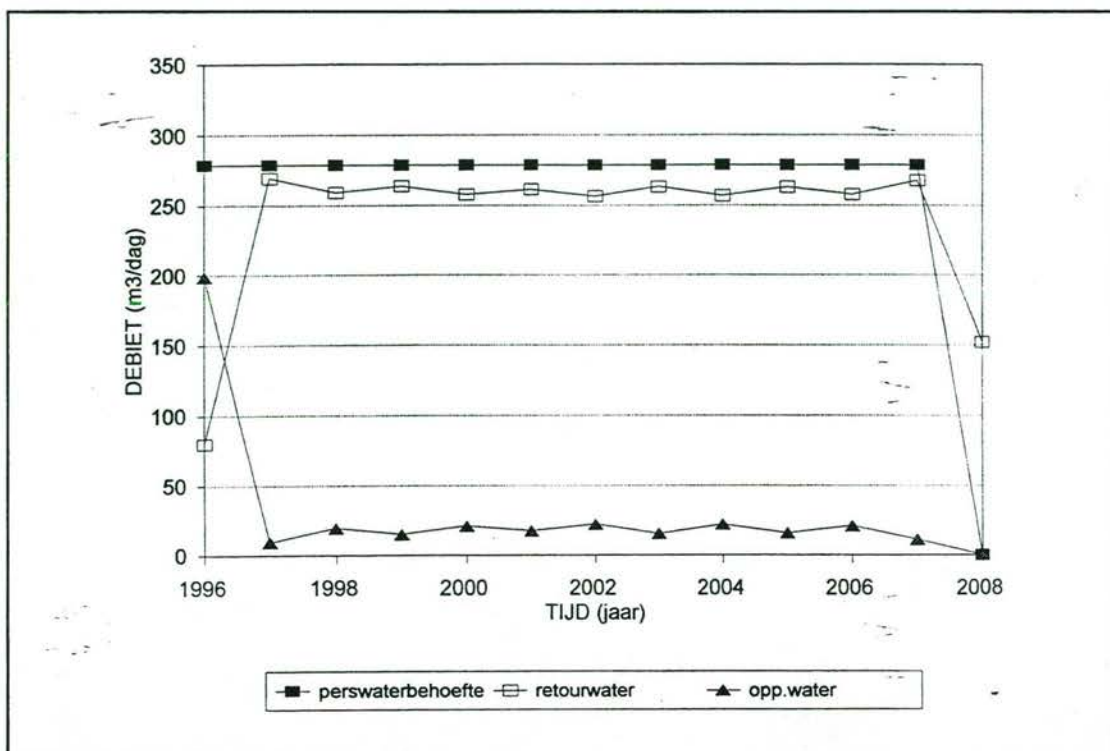
Hierna zal verder ingegaan worden op het effect van recirculatie van retourwater op de kwantiteit en kwaliteit van het te lozen retourwater.

7.2 Debieten

In figuur 7.1 zijn de volgende gemiddelde debieten aangegeven tijdens de vulfase van het depot:

- de perswaterbehoefte, uitgaande van $0,85 \text{ m}^3$ perswater per m^3 in situ specievolume. Voor de berekening wordt verwezen naar § 5.2.1.;
- de retourwaterproduktie, zijnde de som van de debieten aan sedimentatiewater, consolidatiewater en neerslagoverschot;
- het benodigde suppletiedebiet aan oppervlaktewater van buiten het depot, zijnde het verschil in perswaterbehoefte en retourwaterproduktie.

Uit figuur 7.1 komt naar voren dat de produktie van retourwater de vraag naar perswater net niet dekt en dat aanvullend water gesuppleerd dient te worden om de baggerspecie in het depot te kunnen brengen. In het eerste jaar is de retourwaterproduktie laag, omdat bij aanvang van het stort nog geen sedimentatiewater van een vorige stort beschikbaar is. De extra hoeveelheid suppletiewater die in de navolgende jaren benodigd is bedraagt maximaal slechts 8% van de totale perswaterbehoefte. Bij minimaal perswaterverbruik zou de retourwaterproduktie mogelijk juist voldoende kunnen zijn om de perswaterbehoefte te dekken.



Figuur 7.1. Gemiddelde debieten aan benodigd perswater, geproduceerd retourwater en te suppleren oppervlaktewater tijdens de vulfase van depot Averijhaven.

7.3 Kwaliteit van het retourwater

Recirculatie van retourwater heeft een negatief effect op de kwaliteit van het retourwater. Ervan uitgaande dat in het depot een waterschijf van 1 m dikte op de specie wordt gehandhaafd (bovenwaterfase), zal recirculatie ten opzichte van de situatie waarin niet wordt gerecirculeerd, tot gevolg hebben dat

- het $\text{NH}_4^+\text{-N}$ gehalte in het opstaand water nauwelijks verandert aangezien de natuurlijke nitrificatiecapaciteit voldoende is en
- het $\text{NO}_3^-\text{-N}$ gehalte door accumulatie naar verwachting wel zal toenemen.

Uit de deskstudie naar recirculatie en in-situ reiniging van retourwater van grootschalige speciedepots van DEPOTEC | ref.2 | komt naar voren dat storten van de specie in de bovenwaterfase van het depot bij afwezigheid van natuurlijke denitrificatie ongeveer een verdubbeling van het $\text{NO}_3^-\text{-N}$ gehalte laat zien.

Afhankelijk van de toevoer van BCZV via de te storten specie en het consolidatiewater en de mogelijke BCZV produktie als gevolg van algenafsterving zal het $\text{NO}_3^-\text{-N}$ gehalte in het opstaande water bij gedegen depotmanagement aanzienlijk kunnen worden gereduceerd. Met het beschikbaar komen van nieuwe praktijkgegevens en het verrichten van aanvullend pilot onderzoek kan de potentie van natuurlijke denitrificatie in het depot worden vastgesteld.



7.4 Lozing retourwater

Uit hetgeen in § 7.2 is beschreven mag duidelijk zijn dat er geen netto lozing van retourwater plaats zal hebben indien recirculatie van retourwater voor het storten van de specie wordt beoogd. Dit is in overeenstemming met de conclusies uit het de deskstudie van DEPOTEC | ref.2 | .

Gezien het voorafgaande is het zinvol om recirculatie van retourwater toe te passen. In dit verband zal praktijkonderzoek bij bestaande depots nieuwe informatie opleveren met betrekking tot de natuurlijke denitrificatiesnelheid en de factoren die daar een rol bij spelen.



8. RESULTATEN DEPOTMANAGEMENT

In dit hoofdstuk zal nader ingegaan worden op de aspecten betreffende het depotmanagement zoals aangegeven onder 5.1.4. Naast deze genoemde aspecten zal ook kort ingegaan worden op het depotmanagement in relatie tot de eind-inrichting en de beschikbare depotcapaciteit.

8.1 Vulscenario's en stortplanning

De conclusie onder paragraaf 6.4.1 is dat er zich geen problemen zullen voordoen indien de jaarlijks gemiddelde hoeveelheid van 120.000 m³ in 4 maanden wordt gestort. Dit betekent een hoeveelheid van gemiddeld ca 2.000 m³ per werkdag over die periode. Voor een gemiddelde baggerwerk is dit een vrij beperkte capaciteit. Bij de organisatie van baggerprojecten dient hier rekening mee te worden gehouden. Er worden in het kader van stikstofverwijdering in de WVO-vergunning geen specifieke eisen gesteld aan de periode binnen een jaar zodat dat volledig vrij is.

Echter indien de mogelijkheid van optimale denitrificatie bij algengroei en -afsterving in de zomermaanden een zinvolle optie blijkt, verdient het aanbeveling om de stortperiode kort te houden (enige maanden per jaar) en in ieder geval niet in de zomermaanden te laten vallen. Dit geldt voor de situatie waarin retourwater wordt gerecirculeerd bij gebruik als perswater voor de te storten specie. Zonder recirculatie vindt immers geen retourwaterlozing plaats en zijn de lozingseisen ten aanzien van stikstof derhalve niet aan de orde.

8.2 Consolidatie bevorderende maatregelen

De uitgevoerde consolidatie-berekeningen resulteerden in vulhoogtes van het depot in de laatste twee jaren van de vulperiode die rondom de maximale vulhoogte (ca NAP + 15,00m) liggen. De onzekerheden over de kwaliteit van de aan te voeren baggerspecie zijn zodanig dat het niet zinvol is om reeds van het begin af aan maatregelen te treffen om de consolidatie te versnellen, waardoor de capaciteit toeneemt. Het dient wel een punt van zorg te zijn tijdens het storten van de specie zodat het gewenst is om tijdens de vulfase de consolidatie te monitoren opdat tijdig maatregelen kunnen worden genomen. Een aantal voorzorgen, die geen of weinig geld kosten kunnen echter wel van het begin af aan getroffen worden. Deze kunnen bestaan uit het zo min mogelijk water toevoegen bij het baggeren als zodanig en bij het legen van de beunbakken met een bakkenzuiger. Daarnaast kan de gemiddelde consolidatie-snelheid in het depot verhoogd worden door de zanderige specie; die sneller consolideert, zo goed mogelijk te verdelen over het depot door de lokatie van de spuitmond (vrije uitstroomopening, diffusor, enz.) regelmatig te verleggen langs de omtrek of over het gehele oppervlak van het depot door een drijvende leiding toe te passen met de spuitmond verbonden aan een verplaatsbaar ponton.

Een beduidende versnelling van de consolidatie kan alleen gerealiseerd worden door halverwege de vulperiode drijvend in het depot verticale drains aan te brengen nadat via sproeien een drainerende zandlaag op de aangebrachte specie is aangebracht. De drainerende zandlaag dient voorzien te zijn van een afvoer. De kosten van deze maatregelen liggen per ha in de orde van grootte van f 250.000,-- bij een aangenomen lengte van de verticale drains van 10 m en 1



drain per 10 m². Gezien de hoogte van de kosten is deze maatregel niet aan te bevelen en dienen voor zover noodzakelijk de genoemde voorzorgen gehanteerd te worden.

Consolidatie-bevorderende maatregelen, zullen het consolidatie-debiet en de flux van stikstof momentaan vergroten en mogelijk problemen kunnen veroorzaken.

8.3 Toepassing van maatregelen, die de natuurlijke stikstofverwijdering bevorderen

De resultaten van hoofdstuk 6 geven geen aanleiding tot specifieke depot-management maatregelen anders dan het handhaven van de gewenste waterschijf. Mocht in het kader van algengroei en - concentraties de hoeveelheid zwevende stof gemanipuleerd dienen te worden dan zou het depot-management daar in kunnen bijdragen. Een verlaging van het zwevende stofgehalte kan bereikt worden door voldoende waterdiepte te handhaven opdat door golfwerking geen bodemmateriaal in suspensie raakt. Daarnaast kan door een speciale spuitmond en door het plaatsen van de spuitmond vlak boven de bodem de zwevende stof in de bovenste waterlaag beperkt worden.

Verder zou door de wijze van inbrengen van de specie de opname van organisch materiaal in het water in het depot bevorderd kunnen worden indien het gewenst is dat de CZV-opname wordt vergroot. Dit kan door een grotere menging te bevorderen. Nadelen hiervan zijn een hoger zwevende stofgehalte en mogelijk meer uitlevering.

8.4 Bedrijfsvoering buiten het depot

In het kader van stikstofverwijdering en zwevende stof geven de resultaten van hoofdstuk 6 geen aanleiding tot specifieke maatregelen. Indien er behoefte is aan CZV zou eventueel specie met een relatief hoog organisch stofgehalte zo goed mogelijk gespreid kunnen worden aangevoerd gedurende de vulperiode. In het kader van bevordering van de consolidatie is onder 8.2 reeds gemeld dat via een aanpassing van de baggermethode en de vulmethode de uitlevering beperkt zou kunnen worden. De wijze waarop is sterk afhankelijk van de aangeboden specie en de baggerlocatie.

8.5 Eindinrichting

Het depotmanagement heeft invloed op de wijze van eindinrichting en de realisatieperiode van de eindinrichting. Aangenomen wordt dat een bovenafdichting met een drainage-systeem voor het regenwater uiteindelijk zal worden gerealiseerd. Het drainage-systeem dient ook ondanks de verdergaande consolidatie te blijven functioneren, zodat het geplande afschot in stand moet blijven. Indien het depot alleen vanaf de omtrek wordt gevuld dan zal in het centrum de consolidatie-snelheid het kleinste zijn doordat het grovere materiaal dichtbij de spuitmond bezinkt en de uiteindelijke zettingen het grootste zijn. De afvoer van het regenwater naar de omtrek is de eenvoudigste oplossing, maar is in dat geval moeilijk te realiseren. Het verschil in zettingen kan deels gecompenseerd worden door tijdens de exploitatie een overhoogte in het afschot te realiseren. Via het toepassen van een verplaatsbare spuitmond op een ponton met drijvende leiding kan een zo gelijkmatige vulling van het depot bereikt worden. Hierdoor kan de gemiddelde consolidatie-snelheid ook vergroot worden zoals aangegeven onder 8.2.



9. EVALUATIE, CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

In dit hoofdstuk worden de resultaten van het onderzoek zoals beschreven in de voorgaande drie hoofdstukken geëvalueerd. Tenslotte zijn in dit hoofdstuk de eindconclusies en aanbevelingen geformuleerd die uit het onderzoek naar optimaal zuiveringstechnische inrichting en bedrijfsvoering van depot Averijhaven naar voren zijn gekomen.

9.1 Evaluatie

Nitrificatie

Tijdens de vulfase van het depot gedurende de periode 1996 -2007 zal de gemiddelde dagelijks stikstofvracht, die via de te storten specie en het consolidatiewater naar het opstaande water wordt gevoerd, circa 52 kg N per dag bedragen. Simulatie van de (natuurlijke) nitrificatie in het opstaand water geeft aan dat deze N-vracht naar verwachting zonder toepassing van externe technologische maatregelen kan worden opgevangen. Voorwaarde daarbij is wel dat het nitrificerende slib in het opstaande water voldoende in suspensie zal blijven. Dit is bij handhaving van een waterschijf van 1 m dikte (basis uitgangspunt voor de toekomstige bedrijfsvoering en als parameter bij de simulaties gebruikt) geen probleem. Zelfs indien geen recirculatie van retourwater wordt toegepast is de aanwas van nitrificerende bacteriën groter dan de uitspoeling ervan met het te lozen retourwater. Zowel met als zonder toepassing van recirculatie van retourwater behoeven voor nitrificatie derhalve geen aanvullende technologische maatregelen te worden getroffen.

Denitrificatie

Ten aanzien van de natuurlijke denitrificatie blijft de beschikbaarheid van biodegradeerbare CZV de limiterende factor. De natuurlijke denitrificatiecapaciteit wordt daarbij met name bepaald door de fractie makkelijk afbreekbare organische stof in de gestorte specie en de mogelijkheid om algengroei en -afsterving als koolstofbron in te zetten. De potentie van deze laatste mogelijkheid zal nader onderzocht moeten worden. In hoeverre de slibfractie vrijkomend bij hydrocyclonage van een deel van de specie als 'natuurlijke' koolstofbron voor denitrificatie kan worden gebruikt zou in laboratoriumonderzoek nader dienen te worden vastgesteld.

Vooralsnog lijkt toepassing van technologische denitrificatie buiten het depot bij niet recirculeren van het retourwater noodzakelijk. In dat geval wordt voorgesteld om het zandfilter, dat toch al nodig is om bij lozing van retourwater het aanwezige gehalte aan zwevende stof te reduceren, in te zetten. Voor het realiseren van de gewenste denitrificatie is dan dosering van methanol of van een vergelijkbare om niet te verkrijgen CZV-bron noodzakelijk.

Recirculatie

In het geval dat recirculatie van retourwater wordt toegepast ten behoeve van het verpompen van de te storten baggerspecie behoeft geen retourwater te worden geloosd. Zoals eerder aangegeven is er ook dan bij handhaving van een waterschijf van 1 m dikte voldoende capaciteit aan natuurlijke nitrificatie om een laag $\text{NH}_4^+\text{-N}$



gehalte in het opstaande water te bewerkstelligen.

Aangezien bij recirculatie het nitraat gehalte wel zal toenemen zullen, indien in het opstaand water lage nitraatgehaltes gewenst zijn (hoge gehalten remmen immers nitrificatie) zal evenals bij niet toepassen van recirculatie externe denitrificatie dienen te worden toegepast. De hiervoor onder denitrificatie genoemde overwegingen ten aanzien van de beschikbaarheid van een natuurlijke of te verkrijgen/kopen koolstofbron blijven daarbij van kracht.

Depotmanagement

Het depotmanagement, met name de vulstrategie en het peilbeheer van het opstaande water is, gezien de hiervoor beschreven onderzoeksresultaten en overwegingen min of meer vast komen te liggen. Samengevat wordt de volgende bedrijfsvoering van het depot tijdens de vulfase voorgesteld:

- minimaliseren van de uitlevering tijdens het baggeren;
- recirculatie van retourwater voor gebruik als perswater;
- minimaliseren van het gebruik van perswater;
- handhaving van een waterschijfdikte van 1 m op de gestorte specie vanaf de start van de vulperiode;
- gelijkmatig verdelen van de te storten specie over het depotoppervlak;
- alleen toepassen van consolidatie bevorderende maatregelen indien dit aan het eind van de stortperiode in verband met de stortcapaciteit noodzakelijk mocht blijken.

9.2 Conclusies

De belangrijkste conclusies van het onderzoek zijn:

- a. Bij een belasting van 50 kg $\text{NH}_4^+\text{-N/d}$ is de capaciteit van de natuurlijke nitrificatie in het opstaand water in het depot in alle scenario's voldoende groot om de aangevoerde vracht om te zetten in nitraat.
- b. In de eerste jaren in de vulperiode kan naar verwachting een maximale vracht van 100 kg $\text{NH}_4^+\text{-N/d}$ behandeld worden. Bij hogere vrachten zouden, met name in de zomer, ernstige problemen met het zuurstofgehalte van het water kunnen optreden.
- c. Ook bij het storten van de gemiddelde jaarlijkse hoeveelheid specie in een tijdsbestek van vier maanden lijken zich geen problemen voor te doen; wel wordt het zuurstofgehalte gedurende enige tijd zeer laag.
- d. Toepassing van een externe installatie voor nitrificatie van het retourwater is alleen nodig indien een grote veiligheidsmarge wordt gesteld aan het $\text{NH}_4^+\text{-N}$ gehalte in het retourwater. Dit geldt alleen in het geval er geen recirculatie van retourwater wordt toegepast.
- e. Toepassing van technologische denitrificatie buiten het depot bij niet recirculeren van het retourwater lijkt noodzakelijk. Denitrificatie in het zandfilter, ingezet voor de verwijdering van de in het retourwater aanwezige zwevende stof, ligt daarbij het meest voor de hand. Voor het realiseren van de gewenste denitrificatie is dan dosering van methanol of van een vergelijkbare om niet te verkrijgen CZV-bron noodzakelijk.



- f. Indien recirculatie van retourwater wordt toegepast kan de perswaterbehoefte niet niet gedekt worden met de retourwaterproduktie. Dit houdt in dat er in ieder geval geen retourwater behoeft te worden geloosd.
- g. Indien recirculatie van retourwater wordt toegepast, is alleen externe denitrificatie noodzakelijk indien een laag NH_4^+ -N gehalte in het opstaande water wordt beoogd.

9.3 Aanbevelingen

Op grond van dit onderzoek kunnen als belangrijkste aanbevelingen worden gedaan:

- a. Onderzoek naar nitrificatie zou niet zozeer gericht dienen te worden op de groeisnelheid of activiteit van nitrificerende bacteriën, als wel op de zuurstofvoorziening, BZV-gehalten en alkaliteit, die de nitrificatie beïnvloeden.
- b. Het is van groot belang inzicht te verkrijgen in het verloop van de natuurlijke denitrificatie. Vooral de invloed van algengroei en -concentraties zouden hierbij aandacht verdienen, maar ook de denitrificatie in de gestorte specie zelf, welke niet of nauwelijks is onderzocht in het concentratiegebied dat nu aan de orde is.
- c. Onderzoek naar de mogelijke toepassing van de slibfractie van een deel van de te storten specie als C-bron voor denitrificatie verdient eveneens aanbeveling. Met name de wijze van behandelen van deze fractie om de CZV beschikbaar te maken verdient nader aandacht. Op laboratoriumschaal zou vooraf vastgesteld kunnen worden wat onder anaërobe condities het effect van langzaam mengen is op de concentratie van met name de lagere fermentatieproducten van de organische stof in de slibfractie.
- d. In het nog uit te voeren pilot onderzoek zou nagegaan moeten worden wat het effect op de biologische stikstofverwijdering is van sterke schommelingen in de saliniteit. Ook zou vastgesteld dienen te worden in hoeverre factoren die de nitrificatie en/of denitrificatie kunnen limiteren of remmen (aanwezigheid toxische componenten, fosfaattekort enz.) een rol (kunnen) spelen.
- e. Onderzoek met betrekking tot de nitrificatie moeten leiden tot het vaststellen van grenswaarden, waarboven het storten (binnen enige termijn) tijdelijk gestaakt zou dienen te worden.
- f. Technologisch onderzoek op pilot-schaal zou vooral gericht dienen te zijn op te realiseren rendementen bij zeer lage temperaturen. Dit geldt voor zowel nitrificatie als denitrificatie.

**REFERENTIES**

- | 1 | *Vergunning voor het lozen van afvalwater afkomstig van een baggerspeciedepot, voor de definitieve opslag van matig tot sterk verontreinigde baggerspecie, in de voormalige Averijhaven te Velsen*, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 9 februari 1995 (nr. AW 191652).
- | 2 | *Onderzoek naar recirculatie en in-situ reiniging van retourwater van grootschalige speciedepots, DEPOTEC in opdracht van RIZA-Rijkswaterstaat*, Amersfoort, 17 januari 1995 (doc. nr. 95001/RWZ/06).
- | 3 | *Offerte-aanvraag zuiveringstechnische maatregelen depot Averijhaven*, schrijven aan HASKONING van Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, Directie Noord-Holland, Haarlem, 10 juli 1995.
- | 4 | *Milieu-effectrapport baggerspeciéstortplaats Averijhaven Velsen; geotechnische aspecten, appendix II*, ingenieursbureaucombinatie Witteveen + Bos en DHV Milieu en Infrastructuur, in opdracht van Provincie Noord-Holland, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, Directie Noord-Holland en Hoogovens IJmuiden, Haarlem, september 1993.
- | 5 | *Analyseresultaten oppervlaktewater depot Averijhaven*, TauwMilieu, Deventer, 8 augustus en 3 oktober 1995.
- | 6 | *Beoordeling van de lozing van retourwater uit een baggerspeciedepot*, werkdocument 94.120 X, RIZA-Rijkswaterstaat, Lelystad, 25 augustus 1994.
- | 7 | *Ontwerpaspecten speciedepots, resultaten van de tweede fase*, Projectgroep Speciedepots, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, Utrecht, 15 januari 1993.
- | 8 | *Milieu-effectrapport baggerspeciéstortplaats Averijhaven Velsen; aanvulling*, opgesteld door Witteveen + Bos en DHV Milieu en Infrastructuur, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, Directie Noord-Holland, Haarlem, 14 juni 1994.
- | 9 | *Milieu-effectrapport baggerspeciéstortplaats Averijhaven Velsen*, ingenieursbureaucombinatie Witteveen + Bos en DHV Milieu en Infrastructuur, in opdracht van Provincie Noord-Holland, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, Directie Noord-Holland en Hoogovens IJmuiden, Haarlem, september 1993.
- | 10 | Hutchinson G.E. 1975. A treatise on limnology - Volume 1, part 2. John Wiley, New York.
- | 11 | Oleszkiewicz J.A. & S.A. Berquist 1988. Low-temperature nitrogen removal in sequencing batch reactors. *Water Research* **22**: 1163-1171.
- | 12 | Wijffels R.H., E.J.T.M. Leenen & J. Tramper 1993. Possibilities of nitrification with immobilized cells in waste-water treatment: model or practical system? *Wat. Sci. Technol.* **27** (5/6): 233-240.
- | 13 | Jones R.D. & R.Y. Morita 1985. Low-temperature growth and whole-cell kinetics of a marine ammonium oxidizer. *Marine Ecology* **21**: 239-243.
- | 14 | Abeliovich A. & A. Vonshak 1993. Factors inhibiting nitrification of ammonia in deep wastewater reservoirs. *Water Research* **27**: 1585-1590.



- | 15 | Dudel D.E., K. Hilbig 1993. The contribution of the water-sediment interface to the nitrogen transformations in shallow lakes. *Verh. - Int. Ver. Theor. Angew. Limnol.* **25**: 639-645.
- | 16 | Robertson R.A. & J.G. Kuenen 1992. Nitrogen removal from water and waste. *In*: J.C. Fry, G.M. Gadd, R.A. Herbert, C.W. Jones & I.A. Watson-Craik (eds) *Microbial control of pollution*, 48th Proc Int Conf Soc Gen Microbiol, Cardiff 1992.
- | 17 | Thomann R.V. & J.A. Mueller 1987. *Principles of surface water quality modeling and control*. Harpers and Row International, New York, p 292.
- | 18 | Wiegant W.M., J.W. Mulder & B. van der Veer 1994. Toepassing van algen voor nazuivering van afvalwater en behandeling van seizoensgebonden bronnen. *H₂O* **27**: 728-733.
- | 19 | Radmer K.R., P. Behrens & K. Arnett 1987. Analysis of the productivity of a continuous algal culture system. *Biotechnology & Bioengineering* **29**: 488-492.
- | 20 | Henderson-Sellers B. 1984. *Engineering limnology*. Pitman, Boston, London.
- | 21 | Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut. *Luchtverontreiniging en weer*. Staatsuitgeverij 's Gravenhage 1974.
- | 22 | Boller M., W. Guijer & M. Tschui 1994. Parameters affecting nitrifying biofilm reactors. *Proc 2nd Int Conf Specialized Conf on Biofilm Reactors*, October 1993, Paris.
- | 23 | Halmoe G & K Eimhjellen 1981. Low-temperature removal of nitrate by bacterial denitrification. *Water Research* **15**: 989-998.
- | 24 | Luin van F., P. Boers & L. Lyklema 1995. Comparison of denitrification rates obtained by the N₂ flux, the ¹⁵N isotope pairing technique and the mass balance approach, 1995.
- | 25 | Olsen K.R. & F.O. Andersen 1994. Nutrient cycling in shallow, oligotrophic Lkae Kwie, Denmark - I: effects of isoetids on the exchange of nitrogen between sediment and water. *Hydrobiologia* **275/276**: 255-265.
- | 26 | Vogel T.M., R.S. Oremland & K.A. Kvenvolden 1982. Low-temperature formation of hydrocarbon gases in San Fransisco Bay sediment (California, USA). *Chem. Geol.* **37**: 289-298.
- | 27 | STOWA 1994. *Compactsystemen voor de behandeling van stedelijk afvalwater*. STOWA, Utrecht, 1994.
- | 28 | Goering J.J. 1972. The role of nitrogen in eutrophic processes. *In*: R Mitchell (ed) *Water Pollution Microbiology*. John Wiley, New York.
- | 29 | Bloemendaal F.H.J.L. en J.G.M. Roelofs 1988. *Waterplanten en waterkwaliteit*. Koninklijke Nederlandse Natuurhistorische Vereniging, Utrecht.
- | 30 | Hartnack, J., RIZA, mondelinge mededeling, oktober 1995.

**LIJST VAN SYMBOLEN EN BEGRIPPEN****BEGRIPPEN**

aëroob	situatie met zuurstof
anaëroob	situatie zonder zuurstof en zonder nitraat
autotroof	bacteriën die anorganische verbindingen als koolstofbron gebruiken
baggerspecie	waterbodem die opgegraven is
beunschepen	transportschepen voorzien van een laadbak
biologische stikstofverwijdering	omzetting van ammoniumstikstof in stikstofgas (N_2) door nitrificerende bacteriën
bovenwaterfase	periode in de vulfase van een depot waarbij het specieniveau boven de waterspiegel uitkomt
consolidatie	het proces waarbij door de zwaartekracht korreltjes zand dichter bij elkaar gepakt raken en waarbij water verdrongen wordt (ook wel "inklinking" of "zetting" genoemd)
consolidatiefactor ($F_{v,s}$)	verhouding van het specievolume aan het eind van de vulfase van het depot en het sedimentatievolume van de specie aan het eind van het sedimentatieproces
consolidatiefase	periode in de vulfase van een depot waarbij water uittreedt als gevolg van inklinking van de specie
consolidatiewater	water dat vrijkomt als gevolg van zetting van de baggerspecie in het depot
debiet	volume per tijdseenheid
denitrificatie	biologische omzetting van nitraat in stikstofgas (N_2) door heterotrofe bacteriën
depositie	neerslag
depotfactor ($F_{v,d}$)	verhouding van het specie volume an het eind van de vulfase en het in-situ volume van de baggerspecie; de depotfactor is het produkt: $F_{v,u} \times F_{v,s} \times F_{v,c} \times F_g$
depotmanagement	het geheel van maatregelen voor het depot
diffusie	stoftransport



diffusor	constructie aan het eind van de baggerspecieperspijp om de persdruk te verminderen en de baggerspecie langzaam uit te laten vloeien in depot
fermentatieprodukt	produkten die ontstaan tijdens de anaërobe afbraak van organische stof (onder andere vluchtige vetzuren, methaan, H_2 , CO_2)
gastoenname ($F_{v,g}$)	toename van het specievolume in het depot als gevolg van gasvorming door anaërobe afbraak van het in de gestorte specie aanwezig organische materiaal
heterotroof	bacteriën die organische koolstofverbindingen als koolstofbron gebruiken
in-situ volume	volume dat de baggerspecie inneemt voordat het wordt opgebaggerd
jet-water	perswater dat aan de baggerspecie wordt toegevoegd om de specie verpompbaar te maken
natuurlijke (de)nitrificatie	in het depot van nature optredende (de)nitrificatie
neegslagoverschot	jaarlijkse hoeveelheid neeslag minus de jaarlijkse hoeveelheid verdamping, gesteld op 100 mm per jaar
nitrificatie	biologische omzetting van N-Kj-verbindingen in nitraat door autotrofe bacteriën
onderwaterfase	periode in de vulfase van een depot waarbij het specieniveau reikt tot 5 meter onder de waterspiegel
opstaand water	het in het depot op de gestorte baggerspecie staande water
PAK	groep van organische verbindingen met onverzadigde ringstructuren
PCB	groep van gechloreerde organische verbindingen met onverzadigde ringstructuren, worden zeer slecht in de natuur afgebroken
perswater	water dat aan de baggerspecie wordt toegevoegd om de specie verpompbaar te maken
recirculatie	het gebruik van retourwater uit het depot voor het verpompen van baggerspecie



recirculatiewater	retourwater dat wordt hergebruikt voor het verpompen van de te storten baggerspecie
retourwater	water uit het depot, bestaande uit verdringingswater (1 m^3 baggerspecie levert 1 m^3 water), consolidatiewater (inklinkingswater), perswater (voor het verpersen van de baggerspecie) en regenwater
sediment	bodemmateriaal dat zich op de bodem afzet
sedimentatie	het onder invloed van de zwaartekracht bezinken van onopgeloste deeltjes in de baggerspecie (na uitlevering)
sedimentatiefactor ($F_{v,s}$)	verhouding van het volume van de specie aan het eind van de sedimentatie (begin consolidatie) en het stortvolume van de specie
sedimentatievolume	volume van de gestorte specie na sedimentatie c.q. bij aanvang van de consolidatie
sedimentatiewater	water dat "vrijkomt" na sedimentatie van de gestorte specie, waardoor de hoeveelheid opstaand water toeneemt
slakken	lava-achtige materiaal dat vrijkomt bij sterke verhitting van ijzererts
specie	baggerspecie
stortdichtheid	volumieke massa van de baggerspecie tijdens het storten
stortvolume	volume van de baggerspecie tijdens het storten in het depot
suspensie	mengsel van water en hele kleine deeltjes
taludhelling	de schuine kant van het talud
technologische (de)nitrificatie	buiten het depot (extern) plaatshebbende (de)nitrificatie
tussenwaterfase	periode in de vulfase van een depot waarbij het specieniveau reikt van 5 meter tot ± 1 meter onder de waterspiegel
uitlevering	de volumetoename van baggerspecie door bijmenging van water
uitleveringsfactor	verhouding van het stortvolume en het in-situ volume van de baggerspecie



verdringingswater	water dat bij aanvang van de vulfase reeds in het depot aanwezig is en dat door het storten van de baggerspecie wordt verdrongen en als retourwater moet worden geleemd.
vracht	concentratie maal debiet
vulscenario	wijze van peilbeheer in het depot
waterbodem	het deel van de vaste bodem onder en naast oppervlaktewater dat in aard en gedrag afwijkt van de aanliggende vaste bodem
waterschijf	het volume aan opstaand water
zuurstofdeficiet	verschil van verzadigingsconcentratie C_s en heersende concentratie C van zuurstof (mg/l)
zwevende stof	de fractie van onopgeslote deeltjes die achterblijft na droging bij een temperatuur van 100°C

AFKORTINGEN EN SYMBOLEN

A	omzettingssnelheid ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)
A_A	coëfficiënt met een waarde van 0,5 tot 0,7
b	afstervingsnelheid (d^{-1})
b_{15}	idem bij 15°C (d^{-1})
BCZV	biodegradeerbare CZV (mg/l) -
BZV	biologisch zuurstofverbruik in 5 dagen bij 20°C
C	algenconcentratie (g/l)
C_1	warmtecapaciteit van water (J/K)
C, Θ_N	correctiefactor voor vertraging van groeisnelheid bij temperaturen onder 10°C
CH_4	methaan
CO_2	kooldioxide
CZV	chemisch zuurstofverbruik
D	zuurstofdeficiet (mg/l)
D_N	dagnummer
D_w	waterdiepte (cm)
ϵ	emissiviteit van water ($\sim 0,97$)
e_A	waterdampspanning bij heersende luchttemperatuur (Pa)
E_M	lichtconversie (%)



e_s	waterdampspanning bij heersende watertemperatuur (Pa)
H^+	waterstof-proton
ΔH	netto wärmewisseling over wateroppervlak ($J.m^{-2}.S^{-1}$)
H_s	korte-golf straling ($J.m^{-2}.S^{-1}$)
H_A	lange golf-straling ($J.m^{-2}.S^{-1}$)
H_{AR}	gereflecteerde lange golf-straling ($J.m^{-2}.S^{-1}$)
H_{BR}	lange golf-straling van het water ($J.m^{-2}.S^{-1}$)
H_C	conductieve warmteoverdracht ($J.m^{-2}.S^{-1}$)
H_E	warmtetransport door verdamping ($J.m^{-2}.S^{-1}$)
H_{SR}	gereflecteerde korte golf-straling ($J.m^{-2}.S^{-1}$)
H_2	waterstofgas
H_2O	water
I_o	lichtintensiteit (W/m^2)
K_A	reaëratiedeficiet (mg/l)
K_O	zuurstofverzadigingsconstante (mg/l)
K_S	verzadigingsconstante voor het substraat (mg/l)
N	stikstof
N_2	stikstofgas
N_{EIS}	lozingseis totaal stikstof (mg/l)
NH_4^{-N}	ammonium stikstof
NH_4^{+}	ammonium
$NH_4^{+}-N$	ammonium stikstof
N_{kj}	Kjeldahl-stikstof, som van ammonium- en organisch gebonden stikstof
N_{IN}	binnenkomende stikstofvracht (kg/d)
NO_2^{-}	nitriet
NO_3^{-}	nitraat
$NO_3^{-}N$	nitraat-stikstof
O	zuurstofconcentratie (mg/l)
O_2	zuurstof
OH^{-}	hydroxide
P	fosfor
Q_{retour}	retourwaterdebiet

**HASKONING**Koninklijk Ingenieurs-
en Architectenbureau

R	reaëratiesnelheid ($\text{g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$)
R_A	respiratiecoëfficiënt
S	substraatconcentratie (mg/l)
S^0	elementair zwavel
SO_4^{2-}	sulfaat
S_T	stralingsenergie (W/m^2)
T	tempertuur ($^{\circ}\text{C}$)
T_A	luchttemperatuur ($^{\circ}\text{C}$)
T_S	watertemperatuur ($^{\circ}\text{C}$)
U_w, U	windsnelheid (m/s)
Y	opbrengstcoëfficiënt (g/g)
Y_A	opbrengst algengroei ($\text{g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$)
Z	zuurstofverbruik ($\text{g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$)
Z_{20}	idem bij 20°C
σ	Stefan-Boltzmann constante $= 11,7 \times 10^{-8} \text{ cal.cm}^{-2}.\text{dag}^{-1}.\text{K}^4$
μ	groeisnelheid van bacteriën (d^{-1})
μ_{15}	maximale groeisnelheid bij 15°C (d^{-1})
μ_{max}	maximale groeisnelheid (d^{-1})
μ_{NET}	netto groeisnelheid (d^{-1})



HASKONING

Koninklijk Ingenieurs-
en Architectenbureau

BIJLAGE 1

SIMULATIE VAN NITRIFICATIE IN EEN BAGGERDEPOT



INHOUD

1. INLEIDING
2. UITGANGSPUNTEN
 - 2.1 Bacteriegroei en -activiteit
 - 2.1.1 Nitrificerende bacteriën
 - 2.1.2 BCZV-omzettende bacteriën
 - 2.2 Watertemperatuur
 - 2.3 Reaëratie
3. SIMULATIE
 - 3.1 Watertemperatuur
 - 3.2 Biologische reacties
4. RESULTATEN



1. INLEIDING

In deze bijlage wordt een simulatie van de nitrificatie in een baggerdepot beschreven. Deze simulatie is alleen bedoeld om een indicatie van het optreden van nitrificatie te verkrijgen.

De uitgangspunten van het model worden kort beschreven in hoofdstuk 2. De berekeningen zijn weergegeven in hoofdstuk 3. Enige resultaten zijn gegeven in hoofdstuk 4.



2. UITGANGSPUNTEN

Bij het opstellen van het simulatiemodel is uitgegaan van de volgende formulering van de groeisnelheid van nitrificerende en BZV-omzettende bacteriën:

De beschrijving van de groei van de relevante bacteriën is betrekkelijk rudimentair:

- in het model is geen rekening gehouden met de groei van algen;
- begrazing van bacteriën door eencelligen is niet opgenomen in het model;
- er is uitgegaan van een verwaarloosbare consumptie van zuurstof door het sediment.

Er is ervan uitgegaan dat algengroei weliswaar heel belangrijk is, met name voor het gehalte aan zuurstof en voor dat van opgeloste BZV, maar dat de algengroei te ingewikkeld te beschrijven is om in het huidige simulatiemodel op te nemen. Algengroei manifesteert zich met name bij hogere watertemperaturen (en lichthoeveelheden). Tijdens deze situaties is de groeisnelheid van nitrificerende bacteriën geen limiterende factor.

Er zijn slechts weinig gegevens beschikbaar voor een redelijke modellering van de begrazing van bacteriën door eencelligen. Begrazing van bacteriën kan belangrijke invloed hebben op de populaties bacteriën. Er is er echter van uitgegaan dat de begrazing niet zo ernstig is, dat deze significante invloed heeft op de primaire omzettingen.

2.1 Bacteriegroei en -activiteit

2.1.1 Nitrificerende bacteriën

De groeisnelheid van nitrificerende bacteriën bedraagt volgens het Duitse model ARABER:

$$\mu = [\mu_{15} / C \times 1,103^{(T-15)} \times S / (S + K_s) \times O / (O + K_o)] - b_{15} \times 1,09^{(T-15)}$$

waarin

- | | | |
|------------|---|---|
| μ | = | groeisnelheid (d^{-1}) |
| μ_{15} | = | maximale groeisnelheid bij 15°C (d^{-1}), waarde 0,52 d^{-1} |
| T | = | temperatuur (°C) |
| S | = | substraatconcentratie (mg N/l), aangehouden waarde 5 mg N/l; |
| K_s | = | substraat-verzadigingsconstante (mg N/l), waarde 0,7 mg N/l; |
| O | = | zuurstofconcentratie (mg/l) |
| K_o | = | zuurstof-verzadigingsconstante (mg/l); |
| b_{15} | = | afstervingsnelheid bij 15°C (d^{-1}), waarde 0,05 d^{-1} . |
| C | = | correctiefactor voor vertraging van de groeisnelheid beneden temperaturen van 10°C, aangehouden waarde 1,5. |

Omdat in verschillende referenties wordt aangegeven dat de groeisnelheid van nitrificerende bacteriën bij temperaturen onder 10°C lager is dan volgens deze formule berekend kan worden, is in het model uitgegaan van een correctiefactor C die 1 is bij temperaturen boven 10 °C en 1,5 bij lagere temperaturen. Op deze manier wordt bij 5°C een groeisnelheid verkregen die consistent is met de generatietijd van 150 - 200 uur die in de literatuur wordt gegeven | ref.12 | .



De omzettingssnelheid is geacht gerelateerd te zijn aan de groeisnelheid volgens:

$$A = \mu_{\text{NET}} / Y,$$

waarin

μ_{NET} = de netto groeisnelheid (= de groeisnelheid in bovenstaande formule zonder de afstervingsterm);

Y = de opbrengstcoëfficiënt, waarde 0,15 kg DS/kg N;

Het zuurstofverbruik door nitrificerende bacteriën wordt geacht 4,57 x de hoeveelheid omgezette stikstof te zijn.

2.1.2 BCZV-omzettende bacteriën

BCZV (biodegradeerbaar CZV) omzettende bacteriën kunnen op eenzelfde wijze worden beschreven als de nitrificerende bacteriën. Er is echter geen temperatuurvertragsfactor opgenomen.

$$\mu = [\mu_{15}/C \times 1,103^{(T-15)} \times B / (B + K_B) \times O / (O + K_O)] - b_{15} \times 1,09^{(T-15)}$$

met $\mu_{15} = 3,0 \text{ dag}^{-1}$; B = BCZV-concentratie in mg/l; $K_B = 1,0 \text{ mg/l}$; $K_O = 1,0 \text{ mg/l}$; $b_{15} = 0,08 \text{ dag}^{-1}$.

De activiteit is gerelateerd aan de groeisnelheid en de opbrengstcoëfficiënt, met $Y = 0,60 \text{ kg DS/kg BCZV}$.

Zuurstofverbruik

Zuurstofverbruik wordt geacht alleen plaats te vinden door de omzettingen van BCZV en $\text{NH}_4^+\text{-N}$. Voor $\text{NH}_4^+\text{-N}$ is het zuurstofverbruik gesteld op 4,57 x de afname van $\text{NH}_4^+\text{-N}$, voor BCZV 1,00 x de afname van BCZV.

2.2 Watertemperatuur

Voor het schatten van het verloop van bacteriële processen is de temperatuur van doorslaggevende betekenis. De watertemperatuur is niet bekend, maar kan geschat worden door het opstellen van een warmtebalans. Voor de warmtebalans is de beschrijving van Thomann & Mueller aangehouden | ref.20 | :

$$\Delta H = H_S + H_{\text{SR}} + H_A + H_{\text{AR}} + H_{\text{BR}} + H_C + H_E,$$

waarin

ΔH	=	netto warmteuitwisseling over het wateroppervlak;
H_S	=	korte-golf straling;
H_{SR}	=	gereflecteerde korte golf-straling;
H_A	=	lange golf-straling;
H_{AR}	=	gereflecteerde lange golf-straling;
H_{BR}	=	lange golf-straling van het water;
H_C	=	conductieve warmteoverdracht;
H_E	=	warmtetransport door verdamping;



Voor de korte-golf straling kan worden uitgegaan van stralingsgegevens van het KNMI; voor de reflectie kan worden uitgegaan van 50%; de lange-golf straling kan worden beschreven met:

$$H_A = \sigma (T_A + 273)^4 \times (A_A \times 0,031 \sqrt{e_A})$$

waarin

σ = Stefan-Boltzmann constante = $11,7 \times 10^{-8} \text{ cal.cm}^{-2}.\text{dag}^{-1}.\text{K}^4$;

T_A = luchttemperatuur;

A_A = coëfficiënt met een waarde van 0,5 tot 0,7;

e_A = relatieve luchtvochtigheid x waterdampdruk bij verzadiging van de luchttemperatuur.

De emissie van lange golf-straling door het water kan worden beschreven met:

$$H_{BR} = \epsilon \times \sigma \times (T_s + 273)^4$$

waarin

ϵ = emissiviteit van water (circa 0,97);

T_s = de watertemperatuur (°C).

De conductieve warmteoverdracht kan worden beschreven met:

$$H_C = -C_1 \times (19,0 + 0,95 U^2 \times (T_s - T_A)).$$

waarin C_1 is de warmtecapaciteit van water en U is de windsnelheid (m/s).

Het warmteverlies door verdamping kan worden beschreven met:

$$H_E = - (19,0 + 0,95 U^2) \times (e_s - e_A),$$

waarin e_s en e_A de waterdampspanning zijn bij respectievelijk de water- en luchttemperatuur.

Met behulp van deze balans kan de watertemperatuur in een depot geschat worden als de diepte bekend is, met behulp van gegevens over stralingsenergie, luchttemperatuur en windsnelheid.

Stralingsenergie

Gegevens over de stralingsenergie, kunnen via het KNMI verkregen worden; voor de berekeningen is de stralingsenergie te Eelde over 1990 gebruikt | ref.18 | ; deze gegevens zijn hier weergegeven in figuur 1. Met behulp van deze gegevens is een simulatiefunctie opgesteld, die bestaat uit een sinusfunctie:

$$S_T = 961 + 861 \times \sin(0,52 \times D_N/30 - 1,47),$$

waarin D_N is het dagnummer.

Luchttemperatuur

Voor de luchttemperatuur is uitgegaan van een gesynthetiseerd verloop, opgesteld aan de hand van de 30-jaar gemiddelden over 1940 - 1970 | ref.21 | ; de functie is analoog aan die voor de straling en luidt:

$$T = 9,0 + 7,0 \times \sin(0,50 \times D/30 - 1,80)$$

daar bovenop is een random-functie met gemiddelde 0 en standaardafwijking 2 °C gesuperponeerd. Deze random functie is

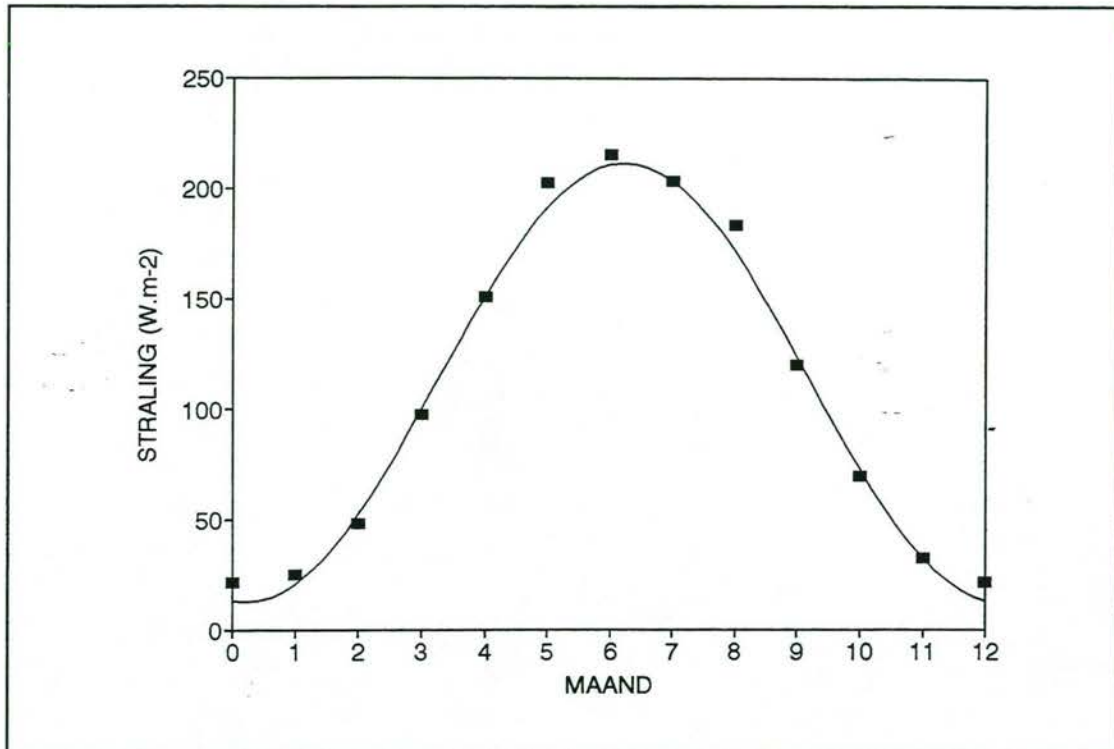
$$\mu + \sigma \times (6 - 12 \times R(0,1))$$

waarin-

μ = het gewenste gemiddelde;

σ = de gewenste standaardafwijking;

$R(0,1)$ = een random getrokken getal tussen 0 en 1 is.



Figuur 1. Stralingsenergie te Eelde in 1990, ontleend aan gegevens van het KNMI.

Windsnelheid

Voor de windsnelheid is uitgegaan van de frequentieverdeling van de windsnelheid zoals is gegeven in het MER-rapport | ref.9 | . Uit een cumulatieve frequentietabel kan met behulp van een random getrokken getal tussen 0 en 100 de windsnelheid worden uitgelezen. Hiermee wordt een windsnelheid gegenereerd, die vrijwel exact dezelfde frequentieverdeling heeft als de vooraf opgegeven frequentieverdeling. Dit is geïllustreerd in figuur 2.

2.3 Reaëratie

De reaëratiesnelheid is de snelheid waarmee zuurstof vanuit de lucht diffundeert in het water. De reaëratiesnelheid is voor een vrijwel stilstaand water een functie van de windsnelheid.

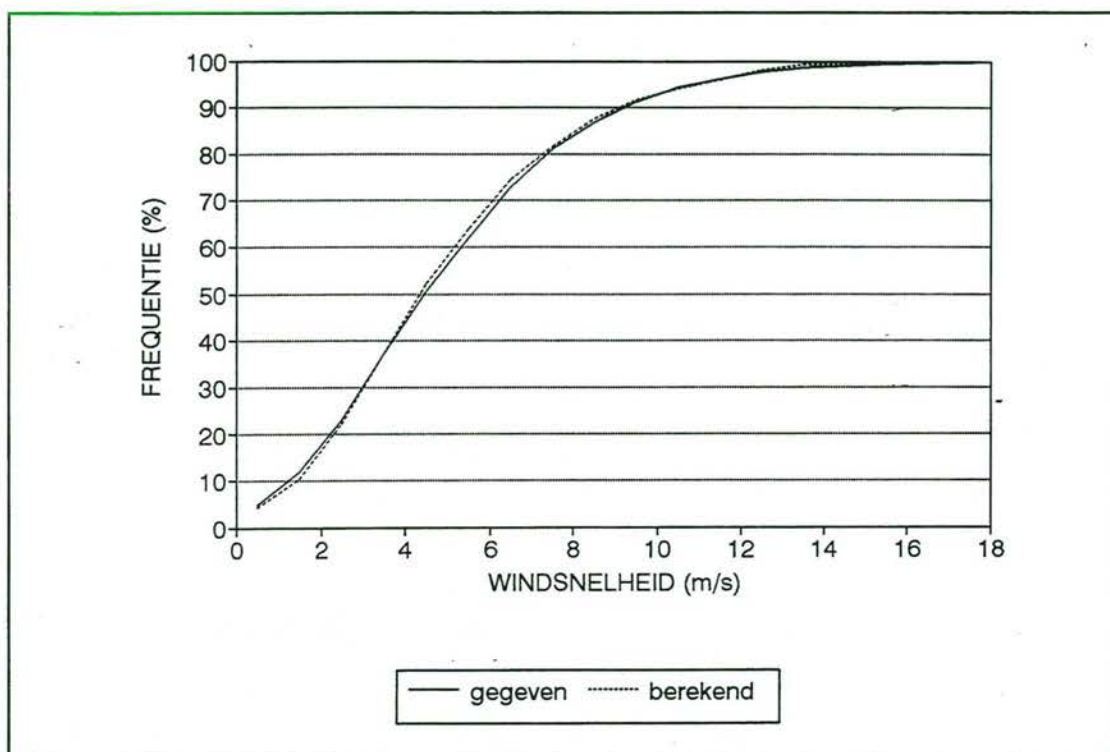
$$R = -K_A \times D$$

waarin

R = reaëratiesnelheid ($\text{g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$);

K_A = reaëratie-constante, afhankelijk van onder andere windsnelheid en zoutgehalte;

D = zuurstofdeficiet $D = C_s - C$, met C_s is verzadigingsconcentratie en C is concentratie (mg/l).



Figuur 2. Frequentieverdeling van de windsnelheid. Ontleend aan KNMI-gegevens voor Schiphol.

De reaëratie-constante voor stilstaande wateren is een functie van de windsnelheid | ref.10,17 | :

$$K_A = 0,782 \sqrt{U_w} - 0,317 U_w + 0,0372 U_w^2$$

De waarden van R zouden kunnen variëren van $130 \text{ g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$'s zomers tot $610 \text{ g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$'s winters | ref.28 | . Deze waarden, gemeten in de Grote Oceaan, zijn echter onwaarschijnlijk hoog en zijn in de berekeningen niet toegepast.



3. SIMULATIE

De simulatie is uitgevoerd in een spreadsheet. Feitelijk bestaat de simulatie uit twee simulaties, één voor de watertemperatuur en één voor de biologische reacties.

3.1 Watertemperatuur

Eens per dag worden berekend of uit een frequentietabel uitgelezen:

- de luchttemperatuur
- de zonnestraling
- de windsnelheid

Hieruit wordt de ΔH berekend uitgaande van de temperatuur van de cyclus ervoor (in dit geval: gisteren), zoals beschreven in § 2.2. Vervolgens wordt de nieuwe temperatuur berekend:

$$T_N = T_{N-1} + \Delta H/D$$

Omdat een tijdseenheid van één dag eigenlijk veel te lang is voor deze berekening, is ervan uitgegaan dat

$$T_N = T_{N-1} + 0,33 \times \Delta H/D.$$

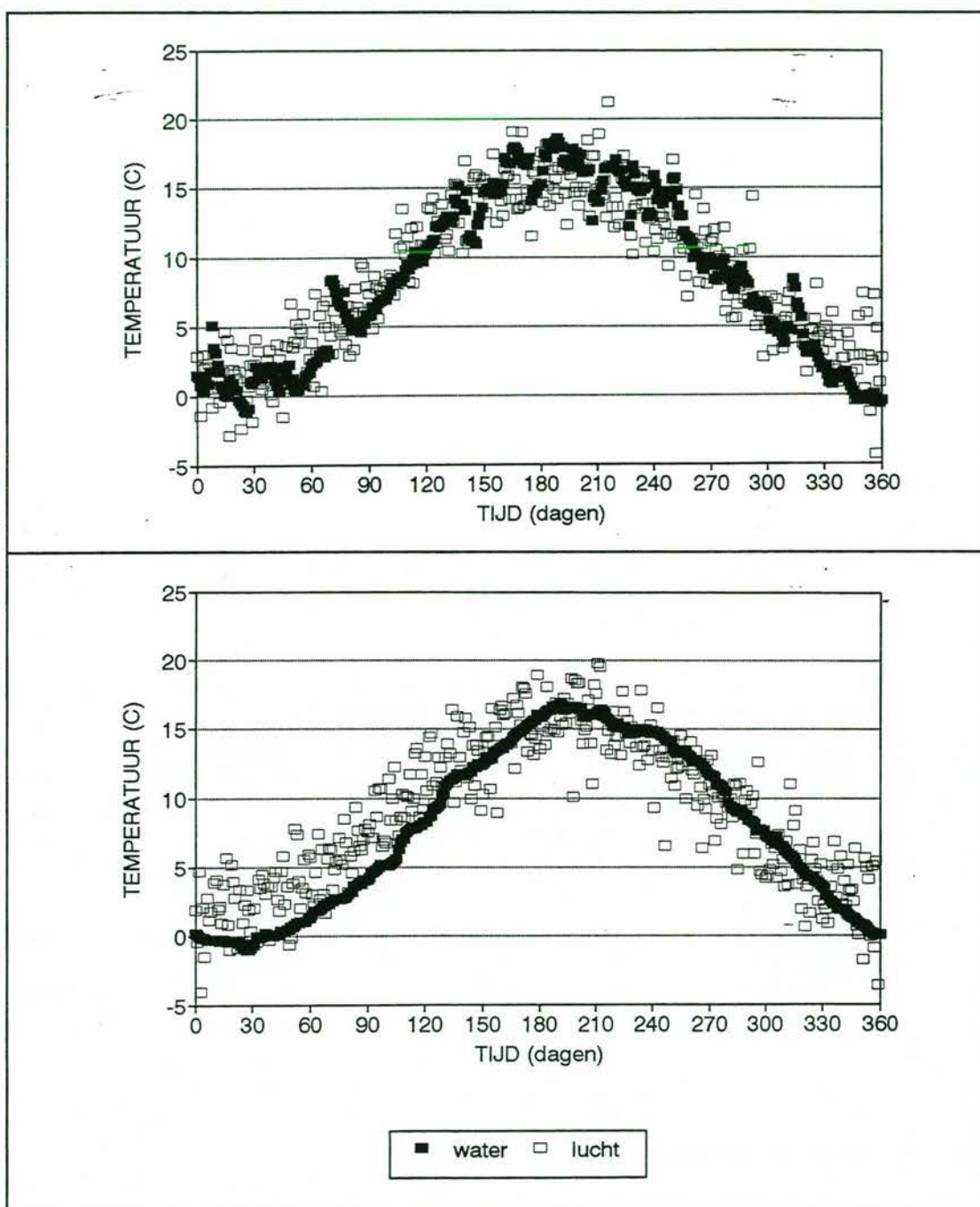
De simulatie met betrekking tot de watertemperatuur is voor twee dieptes telkens één keer uitgevoerd, en daarna zijn in het tweede simulatiemodel deze waarden als gegevens per dag uitgelezen. De gegevens voor de watertemperatuur worden als vaststaand voor één jaar overgebracht in een tabel, waaruit per dag de watertemperatuur wordt uitgelezen.

Een voorbeeld van de watertemperatuur in een jaar is voor twee waterdiepten gegeven in figuur 3. In de figuur is duidelijk te zien dat bij een grotere waterdiepte de watertemperatuur veel meer "achter" loopt bij de luchttemperatuur dan bij een geringe waterdiepte.

3.2 Biologische reacties

Voor het simuleren van de biologische reacties zijn voor een cyclus van 0,05 dag de volgende parameters uitgerekend:

- de concentratie $\text{NH}_4^+\text{-N}$, de resultante van de concentratie tijdens de vorige cyclus, de aanvoer, de uitspoeling en de consumptie;
- de concentratie O_2 , de resultante van de concentratie tijdens de vorige cyclus, de reaëratie, de consumptie door nitrificeerders en CZV-omzettende bacteriën;
- de groeisnelheid, de netto groeisnelheid, de daaruit volgende activiteit en de daaruit volgende concentratie van nitrificerende bacteriën;
- idem voor CZV-omzettende bacteriën.



Figuur 3. Watertemperatuur en luchttemperatuur, bij 1 m diepte (boven) en 4 m diepte (onder).

Tijdens één cyclus worden alle activiteiten en concentraties van die tijdens de vorige cyclus aangehouden om de concentraties te berekenen. Dit levert, als gevolg van de relatief lange cyclusduur, enige problemen op bij zeer lage concentraties, aangezien dit mogelijk negatieve waarden voor bepaalde concentraties oplevert. Daarom zijn voor concentraties van $\text{NH}_4^+\text{-N}$, O_2 en BCZV minimale waarden aangehouden die niet onderschreden mogen worden.



4. RESULTATEN

Voor een normale vracht (50 kg N/dag) is onder evenwicht-omstandigheden het verloop als gegeven in figuur 4. Hierbij wordt onder "evenwichtsomstandigheden" het gehalte aan nitrificerende bacteriën verstaan, dat na een jaar aanwezig is.

Als bij aanvang van de berging nog niet voldoende nitrificerende capaciteit aanwezig is, dan kan het op gang komen van de activiteit aanzienlijke tijd in beslag nemen. Dit is geïllustreerd in figuur 5.

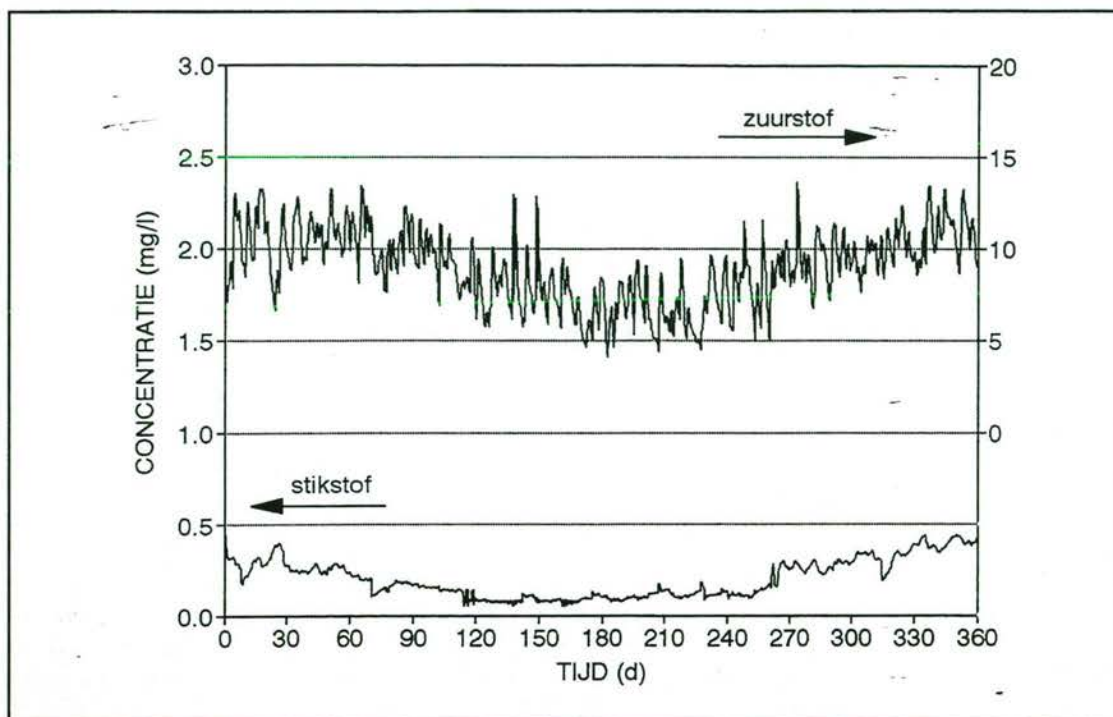
Als de aangehouden μ_{MAX} van de nitrificerende bacteriën een factor 2 lager is dan die oorspronkelijk is aangehouden, dan loopt in de winterperiode het $\text{NH}_4^+\text{-N}$ -gehalte enigszins op. Het verloop is gegeven in figuur 6.

Ook een niet-constante invoer is voorstelbaar. Bij een verloop als in tabel 1 wordt het verloop van $\text{NH}_4^+\text{-N}$ - en O_2 -concentraties als in figuur 7.

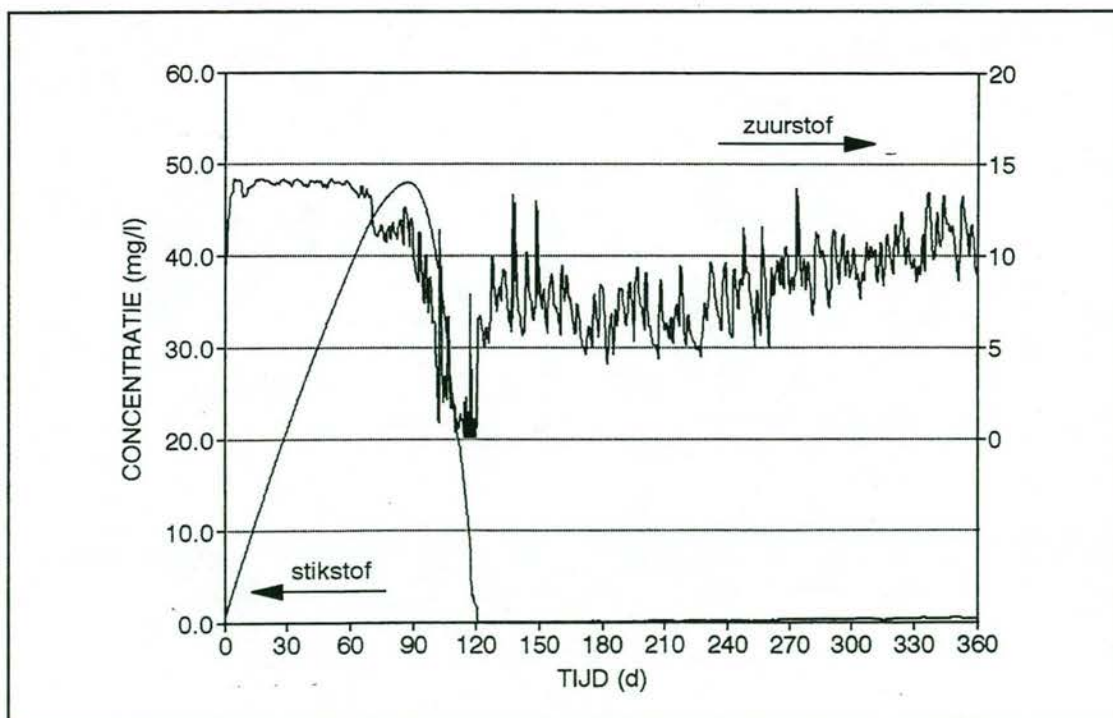
Tabel 1. Aangenomen vrachten en afvoerdebieten bij een niet-constante aanvoer van baggerspecie.

maand (-)	debiet (m ³ /d)	vracht (kg N/d)
1 t/m 4	0	5
5 t/m 8	850	140
9 t/m 12	0	5

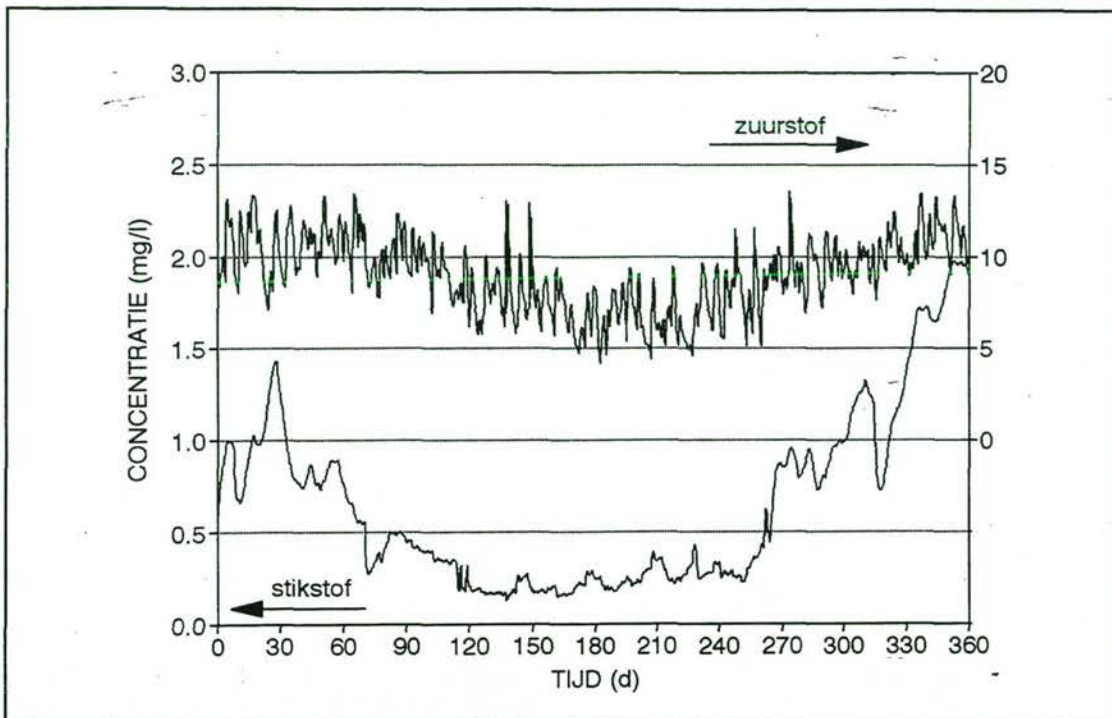
Tot slot is gekeken als de input van BCZV niet de aangenomen 10 kg/d is, maar 10 x zo hoog. Onder deze omstandigheden is er sprake van competitie om zuurstof, welke tot uiting komt in de iets hogere gehalten aan $\text{NH}_4^+\text{-N}$ en lagere O_2 -concentraties. Het verloop is weergegeven in figuur 8.



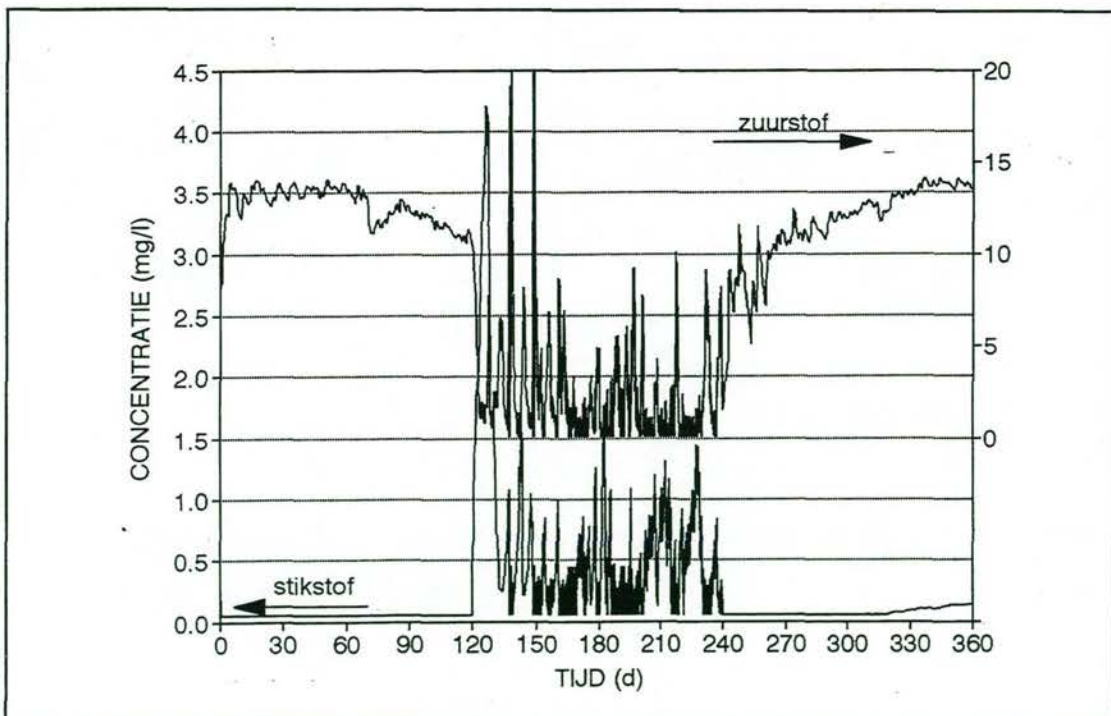
Figuur 4. Verloop van concentraties van $\text{NH}_4^+\text{-N}$ en O_2 gedurende een jaar, bij waterschijfdikte 1 m en het specieniveau van 1996. Voor het gehalte aan nitrificerende bacteriën bij aanvang is het gehalte na één jaar aangehouden.



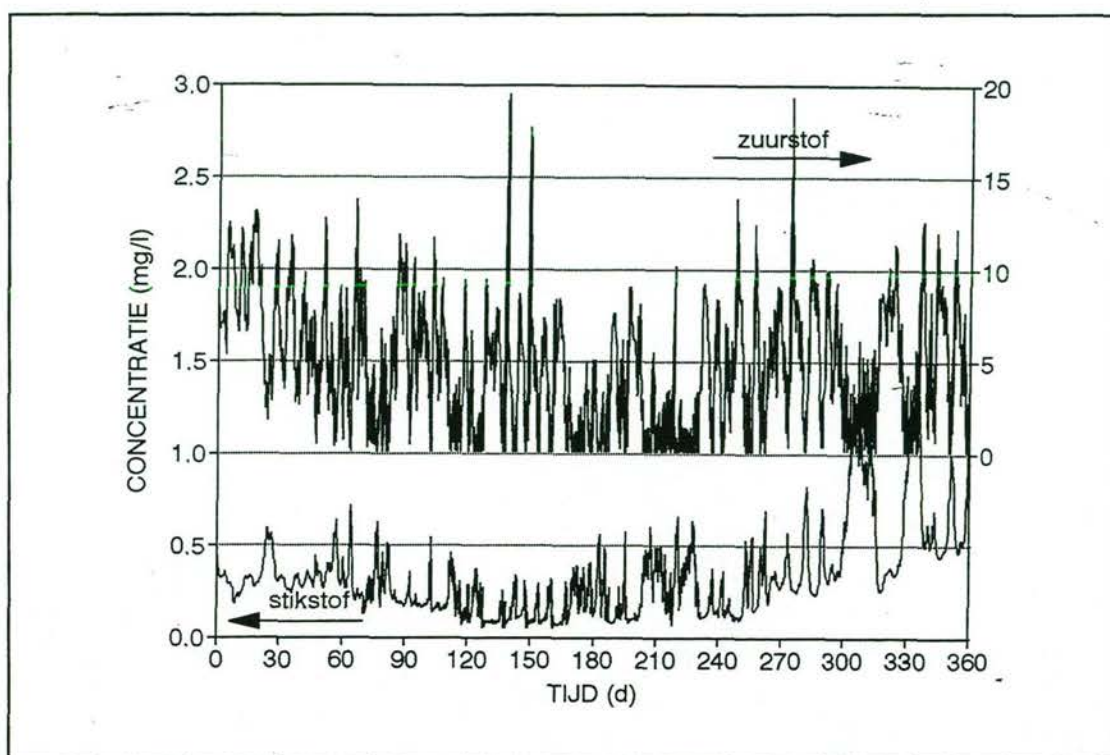
Figuur 5. Verloop van concentraties van $\text{NH}_4^+\text{-N}$ en O_2 gedurende een jaar, bij waterschijfdikte 1 m en het specieniveau van 1996. Voor het gehalte aan nitrificerende bacteriën bij aanvang is een circa 1000 x zo laag gehalte als dat in figuur 4 aangehouden.



Figuur 6. Verloop van concentraties van $\text{NH}_4^+\text{-N}$ en O_2 gedurende een jaar, bij waterschijfdikte 1 m en het specieniveau van 1996. Voor de groeisnelheid 0,26 in plaats van 0,52 dag⁻¹ bij 15°C aangehouden.



Figuur 7. Verloop van concentraties van $\text{NH}_4^+\text{-N}$ en O_2 gedurende een jaar, bij waterschijfdikte 1 m en het specieniveau van 1996. Voor debiet en vrucht zijn de waarden als in tabel 1 aangehouden.



Figuur 8. Verloop van concentraties van $\text{NH}_4^+\text{-N}$ en O_2 gedurende een jaar, bij waterschijfdikte 1 m en het specieniveau van 1996. Voor de BCZV is een waarde van 100 kg/d aangehouden.

