

1993-13_nitrificatie-denitrificatie-compactsystemen

Nitrificatie en denitrificatie in compactsystemen

Evaluatie praktijkonderzoek



Programma PN-1992

stowa

Nitrificatie en denitrificatie in compactsystemen

Evaluatie praktijkonderzoek

Publikaties en het publikatieoverzicht
van de Stowa kunt u uitsluitend
bestellen bij:
Hageman Verpakkers BV
Postbus 281
2700 AC Zoetermeer
tel. 079-611188
fax 079-613927
o.v.v. ISBN- of bestelnummer en
een duidelijk afleveradres.

Programma PN-1992

stowa

INHOUD

BLAD

	TEN GELEIDE	4
1	SAMENVATTING	5
2	INLEIDING	11
3	SYSTEMEN	13
	3.1 Algemeen	13
	3.2 Nitrificerend vastbedsysteem	16
	3.2.1 <i>Hoofdkenmerken</i>	16
	3.2.2 <i>Onderzochte aspecten</i>	17
	3.3 Denitrificerend fluidbedsysteem	17
	3.3.1 <i>Hoofdkenmerken</i>	17
	3.3.2 <i>Onderzochte aspecten</i>	18
	3.4 Denitrificerend vastbedsysteem	18
	3.4.1 <i>Hoofdkenmerken</i>	18
	3.4.2 <i>Onderzochte aspecten</i>	20
4	BEDRIJFSVOERING	21
	4.1 Inleiding	21
	4.2 Algemeen	21
	4.3 Methanoldosering	21
	4.4 Monitoren	22
	4.5 Nitrificerend vastbedsysteem	22
	4.6 Denitrificerend fluidbedsysteem	23
	4.7 Denitrificerend vastbedsysteem	25
5	RESULTATEN	27
	5.1 Inleiding	27
	5.2 Nitrificerend vastbedsysteem	27
	5.2.1 <i>Inleiding</i>	27
	5.2.2 <i>Hydraulische belasting</i>	28
	5.2.3 <i>Temperatuur</i>	31
	5.2.4 <i>Variabel debiet</i>	33
	5.2.5 <i>Zwevend stof</i>	33
	5.2.6 <i>Slibproductie</i>	34
	5.2.7 <i>Biofilmonderzoek</i>	34
	5.3 Denitrificerend fluidbedsysteem	36
	5.3.1 <i>Inleiding</i>	36
	5.3.2 <i>Nitraatverwijdering</i>	36
	5.3.3 <i>Methanol</i>	38
	5.3.4 <i>Zwevend stof</i>	38
	5.3.5 <i>Slibproductie</i>	39
	5.3.6 <i>Biofilmonderzoek</i>	39

5.4	Denitrificerend vastbedsysteem	41
	5.4.1 <i>Inleiding</i>	41
	5.4.2 <i>Nitraatverwijdering</i>	41
	5.4.3 <i>Methanol</i>	43
	5.4.4 <i>Zwevend stof</i>	43
	5.4.5 <i>Slibproductie</i>	43
	5.4.6 <i>Biofilmonderzoek</i>	44
6	TOEPASSING IN DE NEDERLANDSE PRAKTIJK	46
6.1	Inleiding	46
6.2	Nitrificerend vastbedsysteem	46
	6.2.1 <i>Ontwerpcriteria</i>	46
	6.2.2 <i>Dimensioneringsvoorbeelden</i>	48
	6.2.3 <i>Kosten</i>	49
6.3	Denitrificerend fluidbedsysteem	51
	6.3.1 <i>Ontwerpcriteria</i>	51
	6.3.2 <i>Dimensioneringsvoorbeelden</i>	52
	6.3.3 <i>Kosten</i>	52
6.4	Denitrificerend vastbedsysteem	54
	6.4.1 <i>Ontwerpcriteria</i>	54
	6.4.2 <i>Dimensioneringsvoorbeelden</i>	55
	6.4.3 <i>Kosten</i>	55
7	EVALUATIE EN CONCLUSIES	58
7.1	Nitrificerend vastbedsysteem	58
	7.1.1 <i>Bedrijfsvoering</i>	58
	7.1.2 <i>Resultaten</i>	58
	7.1.3 <i>Toepassing in de Nederlandse praktijk</i>	59
7.2	Denitrificerend fluidbedsysteem	60
	7.2.1 <i>Bedrijfsvoering</i>	60
	7.2.2 <i>Resultaten</i>	60
	7.2.3 <i>Toepassing in de Nederlandse praktijk</i>	60
7.3	Denitrificerend vastbedsysteem	61
	7.3.1 <i>Bedrijfsvoering</i>	61
	7.3.2 <i>Resultaten</i>	62
	7.3.3 <i>Toepassing in de Nederlandse praktijk</i>	62
7.4	Conclusies	62

Ten geleide

In 1990 werd het STOWA-onderzoek naar de verwijdering van fosfaat en stikstof op rioolwater-zuiveringsinrichtingen geïntensiveerd en versneld. Doel van het speciaal hierop gerichte spoedprogramma "PN 1992" - dat van de zuiverende waterkwaliteitsdeelnemers alleen al in het STOWA-kader een extra onderzoeksinspanning van zeven miljoen gulden in drie jaar vraagt - is het elimineren van onzekerheden en knelpunten in de thans operationele methoden en technieken. Dit om de zuiverende deelnemers in de STOWA tijdig een voldoende beproefd instrumentarium te bieden om te kunnen voldoen aan de effluenteisen voor die stoffen in 1995 en later.

Onderdeel van het PN 1992-programma is het vaststellen van de mogelijkheden en procescondities van compacte slib-op-dragersystemen, die toegepast zouden kunnen worden bij nitrificatie en denitrificatie van huishoudelijk afvalwater.

Het thans voorliggende rapport geeft de evaluatie van een jaar semi-praktijkonderzoek op de rwzi Houtrust te Den Haag aan het opwaarts doorstroomde nitrificerende vastbedsysteem van Degrémont (het Biofor N-systeem), het denitrificerend tweefasen fluidbedsysteem van Dorr-Oliver (anoxische Oxitronsysteem) en aan het opwaarts doorstroomde denitrificerende vastbedsysteem van Degrémont (Biofor DN systeem).

Op basis van de resultaten van de bedrijfsvoering en de stikstofomzettingcapaciteiten van de systemen is aandacht besteed aan de ontwerpcriteria, dimensionering en kosten voor deze systemen onder Nederlandse omstandigheden.

Het onderzoek werd door het algemeen bestuur van de STOWA - op voorstel van de Stuurgroep PNs 1992* - opgedragen aan DHV Water B.V. (projectteam bestaande uit ing. P.C.A.M. van Helvoort, mw. drs.ir. E. van der Vorm-Gouman, ir. M.R. de Blois en J. Verkuijlen) en namens de STOWA begeleid door een commissie bestaande uit ir. C. Kerstens (voorzitter), ir. S.G. van der Kooij, ing. P.C.J. Kuiper, ir. A. Mulder, ir. P.C. Stamperius en ir. J.K. Vink.

Aan het onderzoek werd medewerking verleend door Degrémont Holland B.V., Dorr-Oliver B.V. en het hoogheemraadschap van Delfland. De STOWA is deze organisaties zeer erkentelijk voor hun inzet bij het onderzoek.

Utrecht, december 1993

De directeur van de STOWA

drs. J.F. Noorthoorn van der Kruijff

- De Stuurgroep PNs 1992 die tot dit project adviseerde, bestond uit:
ir. R. den Engelse (voorzitter), ir. J. Boschloo, ir. C. Kerstens, ir. K.F. de Korte, ir. T. Meijer, ir. P.C. Stamperius, alsmede ir. A.H. Dirkzwager voor de coördinatie met het programma RWZI - 2000. Als technisch secretaris treedt op ir. P. de Jong van Witteveen + Bos Raadgevende Ingenieurs.

1 SAMENVATTING

Het STOWA-rapport "Nitrificatie en denitrificatie in compactsystemen Inventarisatie en praktijkervaringen" van augustus 1991 beschrijft een gerichte literatuurstudie naar de eigenschappen van stikstofverwijderende compactsystemen.

Onder meer op basis van deze literatuurverkenning zijn de volgende systemen, voor onderzoek op kleine praktijkschaal geselecteerd:

- nitrificerend (upflow) vastbedsysteem van Degrémont (Biofor N systeem);
- denitrificerend (tweefasen) fluidbedsysteem van Dorr-Oliver (anoxische Oxitron-systeem);
- denitrificerend (upflow) vastbedsysteem van Degrémont (Biofor DN systeem).

Dit praktijkonderzoek diende om voor de geselecteerde systemen een beoordeling te geven van de mogelijkheden, beperkingen en kosten voor toepassing in de Nederlandse praktijk als nageschakeld systeem. tevens moest het praktijkonderzoek het opstellen van dimensioneringsrichtlijnen mogelijk maken.

In het onderhavige rapport wordt het praktijkonderzoek geëvalueerd dat in de periode van half april 1992 tot half april 1993 is uitgevoerd op de rwzi Houtrust te Den Haag.

De bedrijfsvoeringsaspecten, zoals samengevat in tabel 1, zijn op basis van de praktijkproef bepaald en wijken op een aantal punten af van de aan het begin van de praktijkproef door de leveranciers opgegeven randvoorwaarden. Een belangrijk punt hierbij is, dat voor de vastbedsystemen een minimale gemiddelde hydraulische belasting moet worden aangehouden. Voor het fluidbedsysteem bleek een continue zand/biomassascheiding noodzakelijk voor een goed functioneren bij hogere belastingen.

De resultaten van de praktijkproef zijn samengevat in tabel 2. Uit de praktijkproef is gebleken dat de ontwerpbelasting voor $\text{NH}_4\text{-N}$ of $\text{NO}_3\text{-N}$ overeenkomt met de door de leveranciers opgegeven waarden. De maximale $\text{NO}_3\text{-N}$ -belasting van de denitrificerende systemen blijkt hier ver boven te liggen. Een ander opvallend resultaat is het hoge energieverbruik van het fluidbedsysteem.

De tabellen 3 en 4 geven de belangrijkste aspecten van het ontwerp en de kosten voor twee voorbeeld-rwzi's. Een rendement van 90% met het nitrificerend vastbedsysteem is alleen mogelijk bij een constant aanvoerdebiet. Om dit te realiseren op een rwzi is bij de kostenraming rekening gehouden met een buffertank. Daarnaast blijkt het bij de vastbedsystemen noodzakelijk te zijn een recirculatie aan te brengen om te kunnen voldoen aan de hydraulische randvoorwaarden. Bij het ontwerp van compactsystemen is het van belang de dimensionering af te stemmen op stikstofbelasting én op hydraulische belasting. Bij lagere stikstofconcentraties wordt de hydraulische belasting maatgevend voor de grootte van het compactsysteem. De kosten per kg $\text{NH}_4\text{-N}$ of $\text{NO}_3\text{-N}$ zullen in dat geval sterk stijgen. Dit is geïllustreerd door de kosten van de compactsystemen indicatief te berekenen voor een rwzi van 100.000 i.e., waarbij in tabel 3 is uitgegaan van een hoge stikstofconcentratie in het te behandelen effluent, en in tabel 4 van een lage stikstofconcentratie.

De berekende kosten zijn indicatief en sterk afhankelijk van de aannamen die hieraan ten grondslag liggen. Zo zijn de RWA-DWA verhouding, de energie-aspecten bij de rwzi en het kostenniveau van de slibverwerking en methanol direct van invloed op de kosten. Ook andere locatiespecifieke en commerciële overwegingen kunnen van invloed zijn op de ramingen.

Tabel 1
Bedrijfsvoeringsaspecten van de drie onderzochte systemen

bedrijfsvoeringsaspecten	nitrificerend vastbedstelsysteem	denitrificerend fluidbedstelsysteem	denitrificerend vastbedstelsysteem
- eerste biologische opstart	≈ een maand (bij 14-15°C)	enkele weken (bij 16-19°C)	één à twee weken (bij 18-20°C)
- biologische aanpassings-tijd na een dag droog staan	enkele dagen	≤ een dag	≤ een dag
- bedhoogte	3 meter	vastbed 2,1 meter fluidbed 3 meter	2,2 tot 3 meter
- minimale gemiddelde hydraulische belasting	4 m ³ /(m ² .h)	20 m ³ /(m ² .h)	7 m ³ /(m ² .h)
- minimale hydraulische belasting	2 m ³ /(m ² .h)	n.v.t.	5 m ³ /(m ² .h)
- maximale hydraulische belasting	12 m ³ /(m ² .h)	24 m ³ /(m ² .h)	14 m ³ /(m ² .h)
- frequentie spoelen of zand/biomassascheiding	4x per week	continu	3x per twee dagen
- controle op functioneren	leeglooptijd aan begin spoelcyclus	totale hoeveelheid vaste stof in fluidbed	drukval na spoelcyclus
	NH ₄ -N-hoogteprofiel	verdeling van de plaatselijke vastbed/fluidbed-verhouding bepaald aan monsters, die gedurende 5 minuten zijn bezonken	zwevendstof-concentratie spoelwater NO ₃ -N-hoogteprofiel
- overig	één keer per 10 dagen spoelen met 30 m ³ /(m ² .h) in plaats van 20 m ³ /(m ² .h) één keer per twee weken lucht-leidingen spoelen	met uitsluitend recirculatie blijft de biologische activiteit tenminste een maand aanwezig concentratie bio-massa in het fluidbed maximaal 25 kg/m ³	NO ₂ -N-concentratie controleren één keer per twee weken luchtleidingen spoelen

Tabel 2

Resultaten van de praktijkproef op de rwzi Houtrust

resultaten	nitrificerend vastbed	denitrificerend fluidbed	denitrificerend vastbed
pH (afvoer gem.) temperatuur (afvoer) BZV _{5 gefiltreerd} /NH ₄ -N (aanvoer gem.)	7,0 11,0 - 21,9°C 0,19	7,2 12,8 - 22°C n.v.t.	7,2 10,4 - 21,7 n.v.t.
maximale NH ₄ -N of NO ₃ -N-verwijdering	0,4 tot 1,2 kg/(m ³ .d) afhankelijk van tem- peratuur en hydrau- lische belasting	> 6 kg/(m ³ .d)	> 4,5 kg/(m ³ .d)
ontwerpbelasting NH ₄ -N of NO ₃ -N	0,45 tot 1,3 kg/(m ³ .d) afhankelijk van tem- peratuur en hydrau- lische belasting	1,8 kg/(m ³ .d)	1,8 kg/(m ³ .d)
rendement	90% bij continue hydraulische belasting 85% bij variabele hydraulische belasting	95%	95%
energieverbruik	4000 kWh/m ² .jaar	24.000 kWh/m ² .jaar bij continue zandbiomassa- scheiding	1500 kWh/m ² .jaar
methanolverbruik	n.v.t.	2,75 kg/kg NO ₃ -N _{verw}	2,85 kg/kg NO ₃ -N _{verw}
zwevendstof- verwijdering	≈ 20 mg/l (≈ 44%) bij aanvoer gem. 51 mg/l	≈ 10 mg/l bij aanvoer gem. 28 mg/l	≈ 10 mg/l bij aanvoer gem. 28 mg/l
slibafvoer met het spoelwater/bij de zand/biomassa- scheiding	1,0 kg ds/kg NH ₄ -N _{verw}	0,4 kg ds/kg NO ₃ -N _{verw}	1,1 kg ds/kg NO ₃ -N _{verw}
biofilm	zeer dun met ciliaten	compacte bloemkoolach- tige structuur	dun met dikkere plukken

Tabel 3

Ontwerp en kosten van de onderzochte compactsystemen voor een voorbeeld-rwzi (100.000 i.e.) met een hoge stikstofconcentratie

karakteristieken voorbeeld-rwzi: * DWA-debiet 1000 m ³ /h ● RWA-debiet 3000 m ³ /h * NH ₄ -N-vracht 600 kg/d ● NO ₃ -N-vracht 540 kg/d * NH ₄ -N-concentratie bij DWA 40 mg/l ● NO ₃ -N-concentratie bij DWA 36 mg/l	nitrificerend vastbed	denitrificerend fluidbed	denitrificerend vastbed
NH ₄ -N- of NO ₃ -N-rendement	90 %	95 %	95 %
NH ₄ -N- of NO ₃ -N-ontwerpbelasting	0,75 kg/(m ³ .d) (8-10°C)	1,8 kg/(m ³ .d)	1,8 kg/(m ³ .d)
benodigd reactoroppervlak op basis van ontwerpbelasting	267 m ² 0,49 m ² per kg NH ₄ -N _{verw} /d	100 m ² 0,19 m ² per kg NO ₃ -N _{verw} /d	136 m ² 0,27 m ² per kg NO ₃ -N _{verw} /d
benodigd reactoroppervlak op basis van hydraulische randvoorwaarden	n.v.t.	125 m ² 0,24 m ² per kg NO ₃ -N _{verw} /d	214 m ² 0,42 m ² per kg NO ₃ -N _{verw} /d
benodigde extra voorzieningen	buffertank en recirculatie	-	recirculatie
totaal benodigd oppervlak	3000 m ² 5,6 m ² per kg NH ₄ -N _{verw} /d	250 m ² 0,49 m ² per kg NO ₃ -N _{verw} /d	750 m ² 1,5 m ² per kg NO ₃ -N _{verw} /d
stichtingskosten	f 14.334.000,--	f 9.864.000,--	f 10.480.000,--
kapitaallasten (20 jaar, 8,5%)	f 1.515.000,--/jaar f 7,50/kg NH ₄ -N _{verw}	f 1.042.000,-- f 5,50/kg NO ₃ -N _{verw}	f 1.107.000,-- f 6,--/kg NO ₃ -N _{verw}
bedrijfsvoeringskosten	f 766.000,--/jaar f 4,--/kg NH ₄ -N _{verw}	f 960.000,-- f 5,--/kg NO ₃ -N _{verw}	f 757.000,-- f 4,--/kg NO ₃ -N _{verw}
exploitatiekosten	f 2.281.000,--/jaar f 11,50/kg NH ₄ -N _{verw}	f 2.002.000,-- f 10,50/kg NO ₃ -N _{verw}	f 1.864.000,-- f 10,--/kg NO ₃ -N _{verw}

Tabel 4

Ontwerp en kosten van de onderzochte compactsystemen voor een voorbeeld-rwzi (100.000 i.e.) met een lage stikstofconcentratie

karakteristieken voorbeeld-rwzi: * DWA-debiet 1000 m ³ /h * RWA-debiet 3000 m ³ /h * NH ₄ -N-vracht 270 kg/d ● NO ₃ -N-vracht 230 kg/d * NH ₄ -N-concentratie bij DWA 18 mg/l ● NO ₃ -N-concentratie bij DWA 15,3 mg/l	nitrificerend vastbed	denitrificerend fluidbed	denitrificerend vastbed
NH ₄ -N of NO ₃ -N rendement	85 %	95 %	95 %
NH ₄ -N of NO ₃ -N ontwerpbelasting	0,75 kg/(m ³ .d) (8-10°C)	1,8 kg/(m ³ .d)	1,8 kg/(m ³ .d)
benodigd reactoroppervlak op basis van ontwerpbelasting	120 m ² 0,49 m ² per kg NH ₄ -N _{verw} /d	43 m ² 0,19 m ² per kg NO ₃ -N _{verw} /d	58 m ² 0,27 m ² per kg NO ₃ -N _{verw} /d
benodigd reactoroppervlak op basis van hydraulische randvoorwaarden	250 m ² 1,0 m ² per kg NH ₄ -N _{verw} /d	125 m ² 0,57 m ² per kg NO ₃ -N _{verw} /d	214 m ² 1,0 m ² per kg NO ₃ -N _{verw} /d
benodigde extra voorzieningen	recirculatie	-	recirculatie
totaal benodigd oppervlak	800 m ² 3,5 m ² per kg NH ₄ -N _{verw} /d	250 m ² 1,1 m ² per kg NO ₃ -N _{verw} /d	750 m ² 3,4 m ² per kg NO ₃ -N _{verw} /d
stichtingskosten	f 11.876.000,--	f 9.864.000,--	f 10.480.000,--
kapitaallasten (20 jaar, 8,5%)	f 1.255.000,--/jaar f 15,--/kg NH ₄ -N _{verw}	f 1.042.000,--/jaar f 13,--/kg NO ₃ -N _{verw}	f 1.107.000,-- f 13,50/kg NO ₃ -N _{verw}
bedrijfsvoeringskosten	f 556.000,--/jaar f 6,50/kg NH ₄ -N _{verw}	f 805.000,-- f 10,--/kg NO ₃ -N _{verw}	f 510.000,-- f 6,50/kg NO ₃ -N _{verw}
exploitatiekosten	f 1.811.000,--/jaar f 21,50/kg NH ₄ -N _{verw}	f 1.847.000,--/jaar f 23,--/kg NO ₃ -N _{verw}	f 1.617.000,-- f 20,--/kg NO ₃ -N _{verw}

Op basis van het praktijkonderzoek kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- de onderzochte compactsystemen kunnen worden toegepast op praktijkschaal, binnen de randvoorwaarden voor de bedrijfsvoering zoals vermeld in tabel 1;
- voorsnog vereisen de compactsystemen minimaal een wekelijkse controle op een goed functioneren;
- de ontwerp-stikstofverwijdering van de compactsystemen komt overeen met de door de leveranciers opgegeven waarden; de maximale stikstofverwijdering van de denitrificerende systemen ligt veel hoger dan deze opgegeven waarden;
- het rendement van stikstofverwijdering bedraagt bij een goed ontwerp:
 - . 85-90% voor het nitrificerend vastbedstelsysteem;
 - . 95% voor de denitrificerende compactsystemen;
- de exploitatiekosten per kg N_{verw} zijn sterk afhankelijk van de situatie en liggen in het gunstigste geval rond f 11,- per kg $\text{NH}_4\text{-}N_{\text{verw}}$ of $\text{NO}_3\text{-}N_{\text{verw}}$; dit is duidelijk hoger dan de f 5,- tot f 7,50 die in de literatuurstudie is genoemd;
- het by-passen tijdens RWA-situaties of het afzien van de plaatsing van een buffertank kunnen in specifieke situaties leiden tot lagere kosten; bij hogere nitraatconcentraties kunnen de denitrificerende systemen op een hogere stikstofverwijdering worden gedimensioneerd; daartoe is het dan zinvol specifiek aanvullend onderzoek uit te voeren;
- het ruimtebeslag van de compactsystemen is eveneens sterk afhankelijk van de situatie, maar ligt steeds hoger dan de verwachtingen op basis van het literatuuronderzoek; in een gunstige situatie bedraagt het ruimtebeslag van het nitrificerende vastbedstelsysteem $3,5 \text{ m}^2$ per kg N_{verw}/d , van het denitrificerend fluidbedstelsysteem $0,5 \text{ m}^2$ per kg N_{verw}/d en van het denitrificerend vastbedstelsysteem $1,5 \text{ m}^2$ per kg N_{verw}/d .

Op 1 september 1992 is de amvb van kracht geworden waarin grenzen worden gesteld aan de lozing van totaal-stikstof met het effluent van rioolwaterzuiveringsinrichtingen. De hierin gestelde grenswaarden zijn:

- 10 mg totaal-N/l voor rwzi's met een ontwerpcapaciteit \geq 20.000 i.e. (op basis van 54 gram BZV);
- 15 mg totaal-N/l voor rwzi's met een ontwerpcapaciteit $<$ 20.000 i.e. (op basis van 54 gram BZV).

De grenswaarden voor nieuwe rwzi's gelden met ingang van 1 september 1992, voor bestaande rwzi's gaan ze in per 1 januari 1998. Nieuwe rwzi's met simultane defosfatering mogen echter tot 1 januari 1995 een grenswaarde aanhouden van 15 mg totaal-N/l. In de amvb van 1 september 1992 is aangegeven dat de concentratie totaal-stikstof in het te lozen afvalwater moet worden bepaald als jaargemiddelde.

De beheerder kan van de grenswaarden afwijken als het zuiveringsrendement van totaal-stikstof tenminste 75% bedraagt voor alle in het beheersgebied aanwezige rwzi's gezamenlijk. Dit zuiveringsrendement wordt berekend met de totaal aangevoerde en totaal afgevoerde vracht aan totaal-stikstof per jaar.

De snelle invoering van de grenswaarden betekent dat binnen enkele jaren moet worden begonnen met de voorbereidingen voor de aanpassing van de rwzi's die niet voldoen aan de eisen.

Een effluentconcentratie van 10 mg totaal-N/l als jaargemiddelde is in actief-slibsystemen mogelijk bij zeer lage slibbelasting. Dit vereist aanzienlijke uitbreiding van het aëratievolume, waarvoor bij bestaande rwzi's vaak niet de vereiste ruimte beschikbaar is. Nageschakelde compactsystemen kunnen in deze situatie voorzien in de vergaande stikstofverwijdering op een beperkt oppervlak. Dit is mogelijk doordat bij compactsystemen de biomassa is gehecht op een dragermateriaal, zodat de belasting per m³ reactor hoger en de hydraulische verblijftijd korter is dan bij een actief-slibstelsel.

Het STOWA rapport "Nitrificatie en denitrificatie in compactsystemen Inventarisatie en praktijkervaringen" van augustus 1991 (STORA 91-05) beschrijft een gerichte literatuurstudie naar de eigenschappen van stikstofverwijderende compactsystemen. In het kader van deze literatuurstudie zijn werkende systemen op locatie onderzocht en geëvalueerd op hun toepassingsmogelijkheden.

Onder meer op basis van deze literatuurverkenning zijn de volgende systemen, voor onderzoek op kleine praktijkschaal, geselecteerd:

- nitrificerend (upflow) vastbedstelsel van Degrémont (Biofor N stelsel);
- denitrificerend (tweefasen) fluidbedstelsel van Dorr-Oliver (anoxische Oxitransstelsel);
- denitrificerend (upflow) vastbedstelsel van Degrémont (Biofor DN stelsel).

Bij de selectie zijn de volgende criteria gehanteerd:

- het stelsel is toegepast voor nageschakelde (de)nitrificatie;
- het stelsel is een fluidbed- of een vastbedstelsel;
- het stelsel is toegepast op (semi) praktijkschaal;
- het stelsel is toegepast voor de (de)nitrificatie van huishoudelijk afvalwater.

Het praktijkonderzoek diende voor de geselecteerde systemen een beoordeling te geven van de mogelijkheden, beperkingen en kosten voor toepassing in de Nederlandse praktijk en moest tevens het opstellen van dimensioneringsrichtlijnen voor deze compactsystemen mogelijk maken.

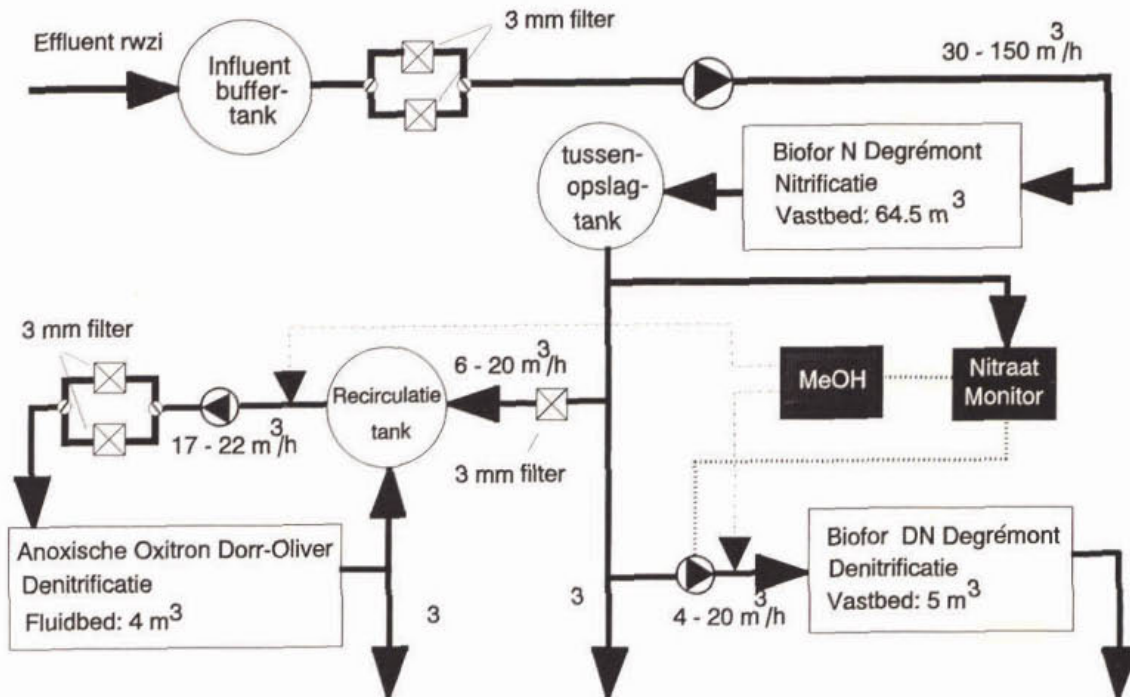
Het onderhavige rapport geeft een evaluatie van het praktijkonderzoek, dat in de periode van half april 1992 tot half april 1993 is uitgevoerd op de rwzi Houtrust te Den Haag.

In hoofdstuk 3 zijn de beproefde systemen op hoofdkenmerken beschreven. Daarnaast is aangegeven welke aspecten zijn onderzocht met de verschillende systemen en met welk doel. Hoofdstuk 4 geeft praktische aanwijzingen voor een goede bedrijfsvoering van de compactsystemen. De resultaten uit analyses en metingen zijn weergegeven in hoofdstuk 5. Ook het uitgevoerde biofilmonderzoek wordt beschreven in dit hoofdstuk. Hoofdstuk 6 geeft de interpretatie van de resultaten gericht op toepassing van compactsystemen in de Nederlandse praktijk. Tot slot worden de resultaten geëvalueerd en worden conclusies getrokken in hoofdstuk 7.

3 SYSTEMEN

3.1 Algemeen

De opstelling van de drie compactsystemen op de rwzi Houtrust te Den Haag is weergegeven in de figuren 1 en 2.



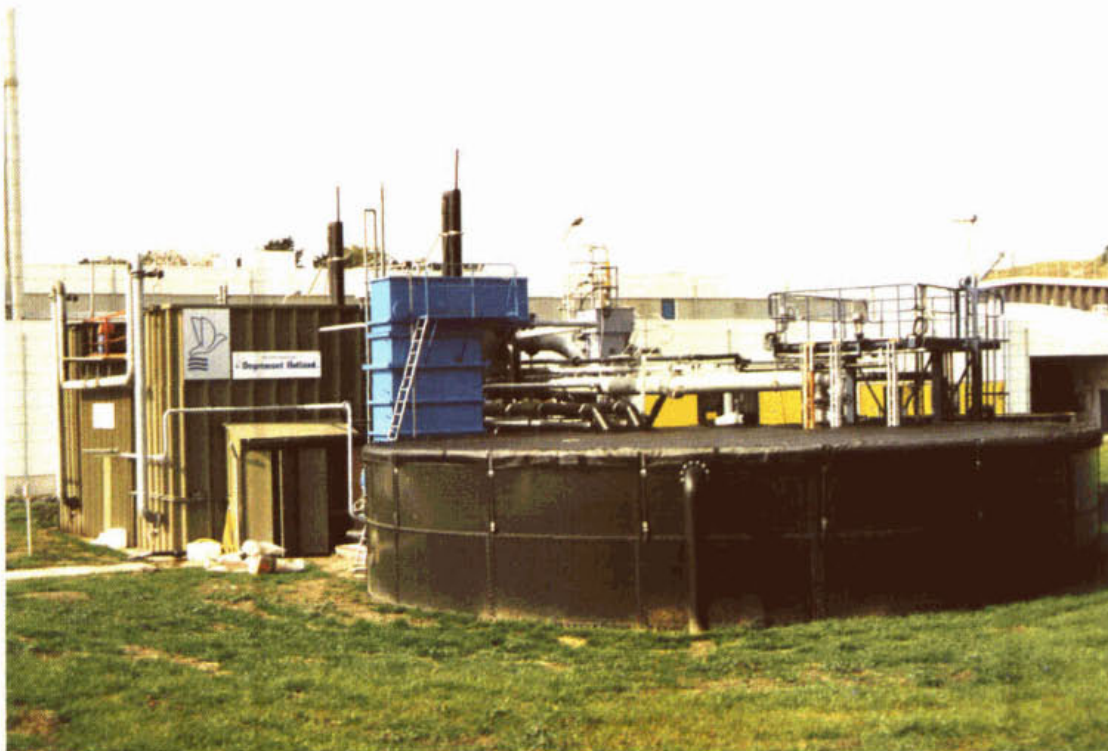
Figuur 1
Blok-schema van de proefopstelling op de rwzi Houtrust te Den Haag

Het effluent van de rwzi Houtrust is in een influentbuffertank gepompt en van daaruit getransporteerd naar het nitrificerende vastbedsysteem. Om verstopping van het waterverdeelstelsel te voorkomen, is het water in dit traject grof gefilterd over filters met een maaswijdte van 3 mm.

De afvoer van het nitrificerende vastbedsysteem mondt uit in een tussenopslagtank. Vanuit deze tussenopslagtank is het genitrificeerde water naar de twee denitrificerende systemen gepompt. Om eventuele verstoppingen van het verdeelstelsel van het fluidbedsysteem uit te sluiten, is in het aanvoerttraject een filter geplaatst met een maaswijdte van 3 mm. De overloop van de tussenopslagtank en de effluentleiding van het denitrificerende vastbedsysteem monden uit in de spoelwateropslagtank. De overloop van deze tank is aangesloten op het effluentkanaal van de rwzi Houtrust. Het effluent van het denitrificerende fluidbedsysteem is direct afgevoerd naar het effluentkanaal van de rwzi Houtrust.

Het slibrijke spoel- en waswater van de systemen is afgevoerd naar de vuilwaterkelder van de rwzi Houtrust.

Het aangevoerde en afgevoerde water van de verschillende systemen is bemonsterd. Hiertoe is bemonsteringsapparatuur geïnstalleerd voor het nemen van een debiet- of tijdproportioneel monster. Iedere dag is een dagmonster van alle bemonsteringspunten door het laboratorium van het Hoogheemraadschap van Delfland geanalyseerd op de volgende parameters:



Figuur 2
Aanzicht van de proefinstallaties voor nitrificatie en denitrificatie op de rwzi Houtrust te Den Haag

- CZV_{totaal} ;
- $CZV_{\text{gefiltereerd}}$;
- $BZV_{5 \text{ totaal}}$;
- $BZV_{5 \text{ gefiltereerd}}$;
- $N_{Kj \text{ totaal}}$;
- $N_{Kj \text{ gefiltereerd}}$;
- $NH_4\text{-N}$;
- $NO_x\text{-N}$;
- $NO_2\text{-N}$;
- o-P;
- P_{totaal} ;
- zwevend stof;
- alkaliteit.

Daarnaast zijn dagelijks de pH en de temperatuur gemeten op de verschillende monsterpunten.

Figuur 3 geeft een overzicht van de met de proefinstallaties uitgevoerde proeven in de tijd. Voor een nadere omschrijving van de proeven wordt verwezen naar de paragrafen 3.2.2, 3.3.2 en 3.4.2.

In deze paragrafen is per systeem tevens een korte beschrijving gegeven van de belangrijkste kenmerken. Naast de in figuur 3 genoemde proeven is in het kader van het praktijkonderzoek een biofilmonderzoek uitgevoerd door TNO (IMW) te Delft.

datum	wk.nr.	Nitrificerend vastbed	Denitrificerend fluidbed	Denitrificerend vastbed
1 maart 1992	10			
	11	OPSTARTEN Biologisch opstarten		
	12			
1 april 1992	13			
	14			
	15			
	16			
1 mei 1992	17	2e oplevering		OPSTARTEN Biologisch opstarten
	18			N-belasting variaties
	19			2e OPLEVERING
	20			N-belasting variaties
1 juni 1992	21			DEFINITIEVE OPLEVERING
	22			
	23			
	24			
	25			
1 juli 1992	26			
	27			
	28			
	29			
	30			
1 augustus 1992	31			Nieuwe reactor 2m2
	32		Schoonmaakactie	
	33	DEFINITIEVE OPLEVERING		
	34	N belastingvariaties zomerse temperaturen		
1 september 1992	35			Biologisch opstarten
	36			DEFINITIEVE OPLEVERING
	37			2m2-reactor
	38			
1 oktober 1992	39		DEFINITIEVE OPLEVERING	
	40		Methanolsturing operationeel N-variaties constant debiet	
	41	Ontwerpcondities		Ontwerpcondities
	42			
	43			
1 november 1992	44			
	45			
	46			
	47			
1 december 1992	48			
	49		Schoonmaakactie	
	50	Debietvariaties		
	51	Ontwerpcondities		
	52			
1 januari 1993	53			N-variaties constant debiet
	1	N-belastingvariaties (winterse temperaturen)		
	2			
	3			
	4			
1 februari 1993	5		Ontwerpcondities	
	6			Schoonmaakactie
	7			
	8			
1 maart 1993	9			
	10	Debietvariaties	N-variaties constant debiet	
	11	Debietvariaties	Schoonmaakactie	Schoonmaakactie
	12	Ontwerpcondities		
1 april 1993	13	variaties hydraulische belasting	Ontwerpcondities bij vaste methanoldosering	
	14	Debietvariaties		
	15	variaties hydraulische belasting		
	16	Ontwerpcondities		

Figuur 3
Overzicht van de uitgevoerde proeven in de tijd

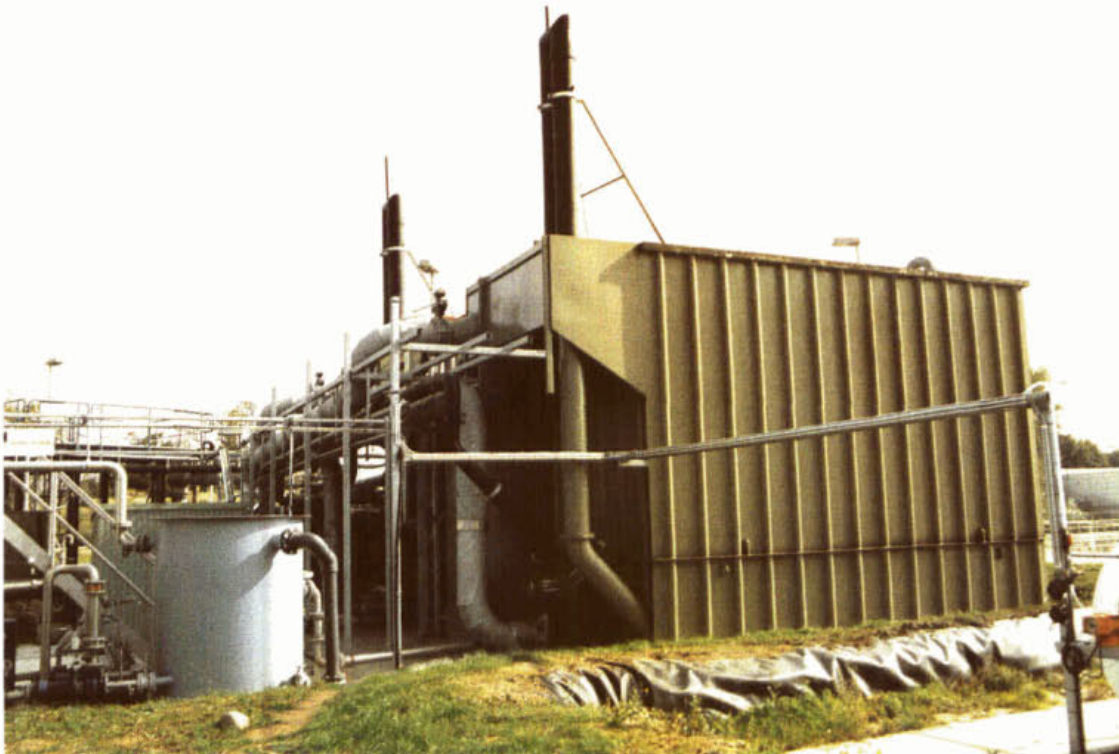
3.2 Nitrificerend vastbedsysteem

3.2.1 Hoofdkenmerken

Figuur 4 geeft een beeld van het nitrificerend vastbedsysteem. De reactor heeft een oppervlak van $21,5 \text{ m}^2$ en is over een hoogte van 3 meter gevuld met geëxpandeerde klei met een diameter van 3 tot 6 mm. Het teveel aan biomassa wordt van het dragermateriaal verwijderd door het gehele bed te spoelen. Dit spoelen gaat automatisch op geprogrammeerde tijden, of bij het overschrijden van de ingestelde veiligheidsdrukval over het bed. De luchtleidingen die zorgen voor de beluchting van het bed moeten regelmatig worden gespoeld met water om eventuele biomassagroei in de leidingen en het verdeelsysteem te verwijderen. Het spoelen van de luchtleidingen wordt bij de proefinstallatie handmatig geïnitieerd.

Door Degrémont zijn bij het begin van de praktijkproeven (april 1992) de volgende dimensioneringsgrondslagen aangegeven voor het nitrificerende vastbedsysteem:

- stikstofverwijdering $0,8 \text{ kg NH}_4\text{-N}/(\text{m}^3 \text{ bed.d})$ bij een constante hydraulische belasting en een stikstofbelasting van $1,1 \text{ kg NH}_4\text{-N}/(\text{m}^3 \text{ bed.d})$;
- stikstofverwijdering $0,6 \text{ kg NH}_4\text{-N}/(\text{m}^3 \text{ bed.d})$ bij een variabele hydraulische belasting en een stikstofbelasting van $0,8 \text{ kg NH}_4\text{-N}/(\text{m}^3 \text{ bed.d})$;
- minimale hydraulische belasting $1,5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$;
- maximale hydraulische belasting $10 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$;
- luchtdebiet $9,5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$;
- twee keer per week spoelen van het bed;
- één keer per twee weken spoelen van de luchtleidingen.



Figuur 4
Het nitrificerend vastbedsysteem van Degrémont (Biofor N systeem)

3.2.2 *Onderzochte aspecten*

Het belangrijkste deel van de proefperiode is gebruikt om de invloed te onderzoeken van de $\text{NH}_4\text{-N}$ -belasting op het $\text{NH}_4\text{-N}$ -verwijderingsrendement en de $\text{NH}_4\text{-N}$ -verwijdering. Dit is onderzocht door beginnend bij een belasting van $0,4 \text{ kg NH}_4\text{-N}/(\text{m}^3 \text{ bed.d})$ deze stapsgewijs te verhogen tot het rendement daalde tot ongeveer 50%. Steeds is gedurende tenminste een week op een ongeveer constante belasting gedraaid, zodat het systeem de gelegenheid had zich aan te passen aan de gewijzigde situatie. Deze proeven zijn zowel in de zomer- als in de winterperiode uitgevoerd, zodat de invloed van de temperatuur kan worden nagegaan. Naast de ingaande en uitgaande concentratie $\text{NH}_4\text{-N}$, de temperatuur en het debiet in de reactor zijn tevens de BZV-belasting, de zwevendstofbelasting en de hydraulische belasting geregistreerd, zodat ook de invloed van deze parameters kon worden nagegaan. Om bij hogere hydraulische belastingen te kunnen werken, is gedurende enkele weken effluent gerecirculeerd.

Daarnaast is gedurende enkele weken de hydraulische belasting van het nitrificerende vastbedstelsysteem over de dag gevarieerd analoog aan de variaties in de aanvoer van de rwzi Houtrust. Hierbij is de gemiddelde hydraulische belasting zodanig gekozen dat de $\text{NH}_4\text{-N}$ -belasting op de ontwerpwaarde lag. Hiermee kon de invloed worden nagegaan van een variabele hydraulische belasting (en daarmee een variabele stikstofbelasting) op de prestaties van het systeem.

3.3 Denitrificerend fluidbedstelsysteem

3.3.1 *Hoofdkenmerken*

Figuur 5 geeft een beeld van het denitrificerende fluidbedstelsysteem. De reactor heeft een oppervlak van $0,9 \text{ m}^2$ en is over een vastbedhoogte van 2,6 meter gevuld met zand met een diameter van 0,3 tot 0,5 mm. De hydraulische belasting is constant gehouden met een recirculatiestroom. Het aanvoerdebiet kon daardoor variëren van 0 tot de maximale hydraulische belasting. Het aanvoerdebiet is bij de proefinstallatie handmatig ingesteld. Als koolstofbron is methanol gedoseerd, automatisch gestuurd op de $\text{NO}_3\text{-N}$ -concentratie van de aanvoer met behulp van het signaal van een nitraatmonitor. Deze sturing was vanaf eind september operationeel. De methanol is in de toevoerleiding gedoseerd. Het teveel aan biomassa op het zand is verwijderd door het begroeide zand aan de bovenzijde van het fluidbed met een centrifugaalpomp uit de reactor te pompen. Scheiding van zand en biomassa vond plaats in een hydrocycloon, waarna het zand werd teruggevoerd naar de reactor. Deze zand/biomassascheiding is bij de proefinstallatie met de hand bediend.

Door Dorr-Oliver zijn bij het begin van de praktijkproeven (mei 1992) de volgende dimensioneringsgrondslagen aangegeven voor het denitrificerend fluidbedstelsysteem:

- vastbedhoogte onbegroeid 2,6 meter (dit resulteert in een begroeide vastbedhoogte van ongeveer 3 meter);
- fluidbedhoogte bij het opstarten 3,1 meter en in volgegroeide toestand 4,8 meter;
- constante hydraulische belasting $20 - 24 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$;
- stikstofbelasting $1,8 \text{ kg NO}_3\text{-N}/(\text{m}^3 \text{ bed.d})$;
- temperatuur in de reactor $5 - 25 \text{ }^\circ\text{C}$;
- slibafvoer met de bovenloop van de hydrocycloon ongeveer $1 \text{ kg ds/kg NO}_3\text{-N}_{\text{verw}}$.



Figuur 5
Het denitrificerend fluidbedsysteem van Dorr-Oliver (anoxische Oxitransysteem)

3.3.2 *Onderzochte aspecten*

In eerste instantie is de invloed onderzocht van de $\text{NO}_3\text{-N}$ -belasting op het $\text{NO}_3\text{-N}$ -verwijderingsrendement en de $\text{NO}_3\text{-N}$ -verwijdering. Dit is nagegaan door het aanvoerdebiet stapsgewijs te wijzigen tussen 7 en 21 $\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$. Door variaties in de aanvoerconcentraties $\text{NO}_3\text{-N}$ varieerde de $\text{NO}_3\text{-N}$ -belasting sterk tussen 1 en 5,8 $\text{kg NO}_3\text{-N}/(\text{m}^3 \text{ bed}\cdot\text{d})$. De proefperiode omvatte zomer- en wintersituaties, zodat de invloed van de temperatuur kon worden nagegaan. Naast de ingaande en uitgaande concentratie $\text{NO}_3\text{-N}$, het aanvoerdebiet en de temperatuur in de reactor zijn tevens de gedoseerde hoeveelheid methanol en de zwevendstofbelasting geregistreerd, zodat ook de invloed van deze parameters kon worden nagegaan.

Daarnaast is gedurende de gehele proefperiode veel aandacht geschonken aan de bedrijfsvoering. Met name is gezocht naar eenvoudig te bepalen parameters waarmee een stabiel functioneren van het fluidbed kan worden beoordeeld. Om een mogelijke invloed van de in de recirculatietank aanwezige biomassa op een stabiele bedrijfsvoering uit te sluiten, is gedurende enkele weken zonder recirculatie gedraaid. In deze periode is juist zoveel methanol gedoseerd dat 1,6 $\text{kg NO}_3\text{-N}/(\text{m}^3 \text{ bed}\cdot\text{d})$ werd verwijderd.

3.4 **Denitrificerend vastbedsysteem**

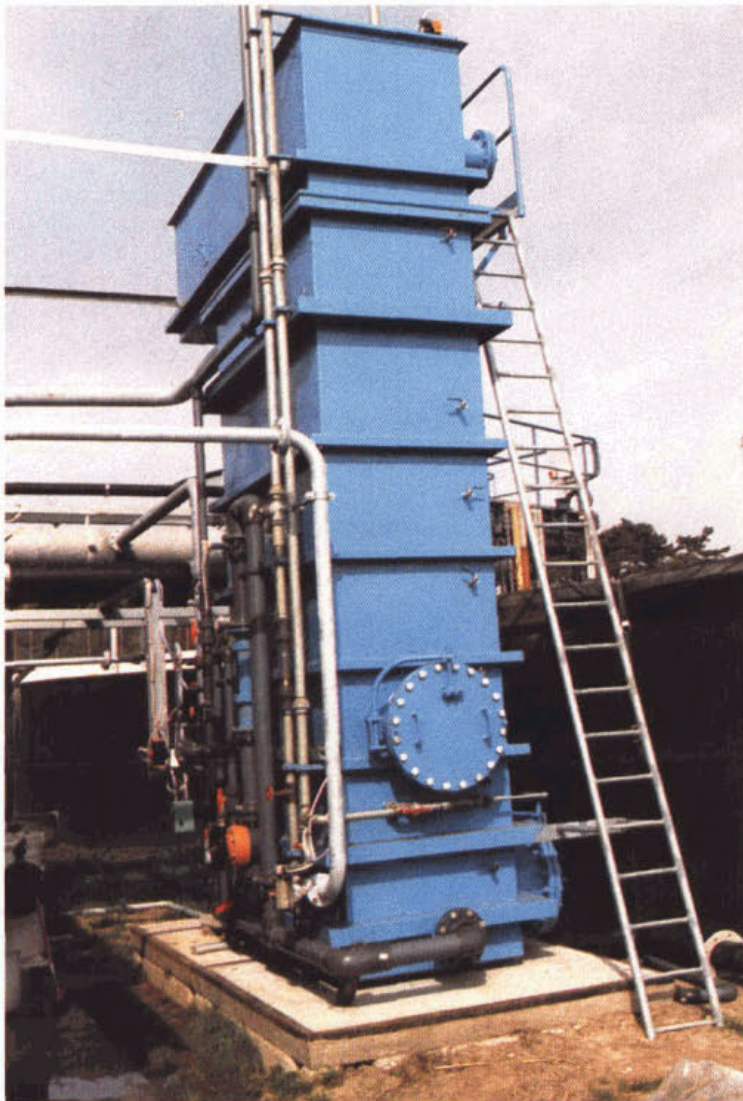
3.4.1 *Hoofdkenmerken*

Figuur 6 geeft een beeld van het denitrificerende vastbedsysteem. De reactor heeft een oppervlak van 2 m^2 en is over een hoogte van 2,85 m gevuld met geëxpandeerde klei (diameter 2 tot 7 mm). Het debiet is bij de proefinstallatie met de hand ingesteld. Als koolstofbron is methanol gedoseerd, gestuurd op nitraatvracht met de signalen van een nitraatmonitor en een

debietmeter in de aanvoer van de reactor. De methanol is gedoseerd met een apart verdeelsysteem in het bed, in een deelstroom van de toevoer. Het teveel aan biomassa wordt van het dragermateriaal verwijderd door het gehele bed te spoelen. Dit spoelen gaat automatisch op geprogrammeerde tijden, of bij het overschrijden van de ingestelde veiligheidsdrukval over het bed.

Door Degrémont zijn bij het begin van de praktijkproeven (september 1992) de volgende dimensioneringsgrondslagen aangegeven voor het denitrificerend vastbedstelsel:

- stikstofverwijdering $1,6 \text{ kg NO}_3\text{-N}/(\text{m}^3 \text{ bed.d})$ bij een stikstofbelasting van $1,8 \text{ kg NO}_3\text{-N}/(\text{m}^3 \text{.d})$;
- minimale hydraulische belasting $1,5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{.h})$;
- maximale hydraulische belasting $10 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{.h})$;
- iedere twee dagen spoelen van het bed;
- methanoldosering in een deelstroom van 95% in het bed.



Figuur 6
Het denitrificerend vastbedstelsel van Degrémont (Biofor DN systeem)

3.4.2 *Onderzochte aspecten*

In eerste instantie is de invloed onderzocht van de $\text{NO}_3\text{-N}$ -belasting op het $\text{NO}_3\text{-N}$ -verwijderingsrendement en de $\text{NO}_3\text{-N}$ -verwijdering. Dit is nagegaan door de hydraulische belasting stapsgewijs te verhogen van 2 tot $10 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$. Door variaties in de aanvoerconcentraties $\text{NO}_3\text{-N}$ varieerde de $\text{NO}_3\text{-N}$ -belasting sterk tussen 0,7 en 4,5 $\text{kg NO}_3\text{-N}/(\text{m}^3 \text{ bed.d})$. De proefperiode omvatte alleen wintertemperaturen, zodat over de invloed van de temperatuur slechts onder voorbehoud uitspraken kunnen worden gedaan. Tevens zijn de gedoseerde hoeveelheid methanol en de zwevendstofbelasting geregistreerd, zodat ook de invloed van deze parameters kon worden nagegaan.

Daarnaast is gedurende de gehele proefperiode veel aandacht geschonken aan de bedrijfsvoering. Gezocht is naar randvoorwaarden waarbij de hoeveelheid biomassa in de reactor constant blijft.

4 **BEDRIJFSVOERING**

4.1 **Inleiding**

De compactsystemen voor nitrificatie en denitrificatie zijn onderzocht op kleine praktijkschaal. Hierdoor is niet alleen inzicht verkregen in de technologische prestaties van de systemen, maar is ook veel ervaring opgedaan met de bedrijfsvoering. Dit hoofdstuk geeft de bedrijfsvoeringsaspecten weer die van belang zijn bij toepassing van compactsystemen voor nitrificatie en denitrificatie in de praktijk.

4.2 **Algemeen**

Compactsystemen zijn snel reagerende systemen met een korte hydraulische verblijftijd en verschillen daardoor sterk van actiefslibsystemen. Door de korte hydraulische verblijftijd in compactsystemen is het belangrijk een goed inzicht te hebben in de stikstofbelasting van het systeem. Hiervoor zijn debietmeters en een snelle ammonium- of nitraatbepaling (bijvoorbeeld monitoren) noodzakelijk. Dit brengt met zich mee dat ook de constructie en de bediening van compactsystemen geheel anders zijn dan bij actiefslibsystemen. Voor een goede bedrijfsvoering van de installatie is scholing nodig van het bedienende personeel, gericht op de specifieke technologische en werktuigbouwkundige aspecten.

Compactsystemen zijn in principe automatisch werkende systemen. Bij opstarten en bij storingen kan echter handbediening noodzakelijk zijn. Alle te bedienen onderdelen, zoals afsluiters en pompen, moeten daarom goed bereikbaar zijn.

Denitrificerende compactsystemen zijn tot nu toe met name toegepast voor denitrificatie van drinkwater. Een kenmerkend verschil tussen drinkwater en afvalwater is het zwevendstofgehalte. De in afvalwater gebruikte apparatuur, zoals bijvoorbeeld niveaumeters, mogen daarom niet gevoelig zijn voor vervuiling. Dit geldt ook voor eventuele bemonsteringsapparatuur. Bovendien moeten alle onderdelen van de bemonsteringsapparatuur tenminste één keer per week zorgvuldig worden gereinigd om de gevormde biofilm te verwijderen.

Tijdens de proefperiode is gebleken dat alle kunststof onderdelen zeer snel begroeid raken met biomassa. Roestvaststalen leidingen daarentegen vertoonden geen aangroei van biomassa.

4.3 **Methanoldosering**

De nitraatconcentratie in de aanvoer naar denitrificerende compactsystemen zal bij rwzi's normaliter sterk kunnen variëren. De methanoldosering moet daarom worden geautomatiseerd. Wanneer het aanvoerdebiet naar het compactstelsel handmatig wordt ingesteld, kan hiervoor worden volstaan met het signaal van een nitraatmonitor die de nitraatconcentratie in de aanvoer registreert. Bij een variabel aanvoerdebiet moet eveneens worden gestuurd op het signaal van de debietmeter.

Bij methanoldosering op basis van nitraatvrucht moet de hoeveelheid methanol per kg aangevoerde $\text{NO}_3\text{-N}$ in de praktijk zodanig worden ingesteld dat de methanolconcentratie in de afvoer maximaal 1 à 2 mg/l bedraagt. Dergelijke lage methanolconcentraties in de afvoer zijn alleen te realiseren bij een nauwkeurige en traploos instelbare methanoldoseerpomp. Voor een snelle inregeling van de methanoldosering op het monitorsignaal is een methanoldebietmeter noodzakelijk. Het methanoldebiet kan daarmee direct worden afgestemd op de door de nitraatmonitor aangegeven aanvoerconcentratie $\text{NO}_3\text{-N}$. Ter controle van de ingestelde

methanoldosering moeten enkele steekmonsters van de afvoer worden geanalyseerd op methanol met een nauwkeurigheid van 0,1 mg/l. Als de methanoldosering goed is ingesteld kan op basis van de concentratie $\text{NO}_3\text{-N}$ in de afvoer (moet altijd zeer laag zijn) vervolgens worden nagegaan of de methanoldosering goed blijft functioneren.

Een ideale situatie ontstaat wanneer naast de sturing van de methanoldosering op nitraatvracht een fijnregeling wordt aangebracht op de methanolconcentratie in de afvoer. De ontwikkeling van een methanolmonitor is in de praktijk opgepakt door de firma Skalar. Een belangrijk aspect is, dat denitrificatie in de monsternameleiding en de monitor door biomassagroei absoluut moet worden voorkomen. Dit kan door aan het begin van de monsternameleiding een kleine hoeveelheid hypochloriet te doseren.

4.4 Monitoren

De methanoldosering wordt gestuurd door een nitraatmonitor. Een goede en betrouwbare werking van deze monitor is daarom essentieel voor een denitrificatieproces met een continu hoog rendement.

De gebruikte monitoren moeten zodanig zijn geconstrueerd dat het vaak hoge zwevendstofgehalte in het water geen problemen oplevert bij een normaal onderhoud. Een gewoon filter in de toevoerleiding naar de monitor mag niet worden toegepast. Door de ophoping van biomassa in dit filter gaat het biologische proces door. Bij de nitraatmonitor zijn hierdoor binnen een week afwijkingen tot 20% geconstateerd. Wel kan, indien nodig, een crossflow filter worden toegepast (rapport STOWA 93-04 Monitoren P en N). Ook door biomassagroei aan de leidingwand kunnen de resultaten worden beïnvloed. De leidingen moeten daarom zo kort mogelijk zijn en de doorstromingsnelheid zo groot mogelijk.

Bij de proefinstallaties is voor sturing van de methanoldosering gebruik gemaakt van een Dr Lange nitraatmonitor. Deze monitor is in de proefperiode slechts één keer uitgevallen door een technisch mankement. Het onderhoud bij de hoge zwevendstofconcentratie van de proefinstallatie is beperkt gebleven tot 2 uur per week. De ijking op 0 met een standaard geeft echter geen volledige betrouwbaarheid op een juiste ijking. De ijking moet daarom worden gecontroleerd met een bekende nitraatoplossing. Daarnaast is ook een Skalarmonitor gebruikt voor nitraat en methanol. Deze monitor geeft zeer nauwkeurige waarden, maar is gevoelig voor vervuiling en storingsen. Hypochlorietdosering in de toevoerleidingen naar de monitor is noodzakelijk om verstoring van het proces door vervuiling te voorkomen. Het onderhoud kost ongeveer een dag per week en moet worden uitgevoerd door een ervaren analist. Beide monitoren kunnen worden gebruikt voor batchmetingen. Hierdoor kunnen steekmonsters worden geanalyseerd op nitraat of methanol, zodat snel inzicht kan worden verkregen in het functioneren van de systemen.

De door monitoren aangegeven concentraties moeten, bijvoorbeeld maandelijks, met laboratoriumanalyses worden gecontroleerd op hun juistheid. Er kan sprake zijn van een systematische afwijking.

4.5 Nitrificerend vastbedstelsel

Het eerste biologische opstarten van het nitrificerend vastbedstelsel, totdat de nitrificatie stabiel is, duurde bij de proefinstallatie ongeveer een maand. De eerste weken van deze periode functioneerde de installatie batchgewijs. De watertemperatuur was gedurende de gehele opstartperiode 14 - 15°C, de alkaliteit varieerde tussen 4,9 en 10,4 meq/l (als OH^-).

Een goed nitrificerend vastbedstelsysteem heeft een biologische aanpassingstijd nodig van enkele dagen, als de reactor gedurende (hooguit) een dag droog heeft gestaan.

De nitrificerende biomassa bevindt zich waarschijnlijk uitsluitend op het dragermateriaal. Voor een goede nitrificatie is het noodzakelijk dat deze biomassa goed bereikbaar is voor ammonium, lucht en CO_2 . Dichtslibben van het bed met zwevendstof, BZV-verwijderende biomassa en de daarbij behorende wormen moet daarom zoveel mogelijk worden voorkomen. Bij een gemiddelde zwevendstofconcentratie van ongeveer 45 mg/l kan dit worden bereikt door:

- de gemiddelde hydraulische belasting niet lager te kiezen dan $4 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ met een absoluut minimum van $2 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$;
- een maximale hydraulische belasting aan te houden van $12 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$;
- het bed vier keer in de week te spoelen;
- één keer per 10 dagen te spoelen met een debiet van $30 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ in plaats van de gebruikelijke $20 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$.

De leeglooptijd aan het begin van de spoelcyclus (het waterniveau wordt dan een halve meter verlaagd) is een goede indicatie voor het functioneren van het bed. Toename van de leeglooptijd wijst op dichtslibben van het bed. Een extra spoeling met een debiet van $30 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ is dan noodzakelijk. Daarnaast is het belangrijk dat de luchtleidingen niet verstopt raken. Hiervoor moeten de luchtleidingen tenminste één keer per twee weken met water worden gespoeld met een druk van minimaal $2 \cdot 10^5 \text{ Pa}$. Zodra de luchtverdeling op het oppervlak van het nitrificerend vastbedstelsysteem onregelmatig wordt, moeten extra spoelingen van de luchtleidingen worden uitgevoerd.

Door de intensieve beluchting van het water ontstaat normaliter behoorlijke schuimvorming. Deze schuimvorming kan in het algemeen effectief worden bestreden door het gehele oppervlak continu met effluent te besproeien. Hiervoor moeten sproeiers worden gekozen die niet dichtslibben door in het effluent aanwezige zwevend stof.

De werking van het nitrificerend vastbedstelsysteem kan worden gecontroleerd met een $\text{NH}_4\text{-N}$ -hoogteprofiel over het bed. Het vastbedstelsysteem wordt optimaal gebruikt als de $\text{NH}_4\text{-N}$ -concentratie juist bovenin het bed de gewenste afvoerconcentratie bereikt (figuur 7).

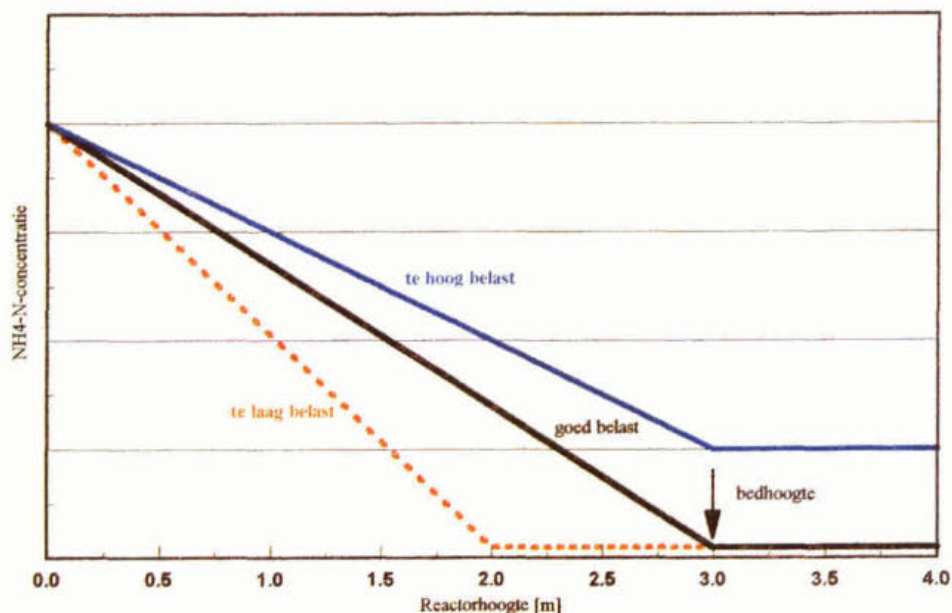
4.6 Denitrificerend fluidbedstelsysteem

Het eerste biologische opstarten van het denitrificerend fluidbedstelsysteem, totdat de denitrificatie stabiel is, duurde bij de proefinstallatie enkele weken. De watertemperatuur was daarbij $16 - 19 \text{ }^\circ\text{C}$. Een goed denitrificerend fluidbedstelsysteem heeft een biologische aanpassingstijd van hooguit een dag, nadat de reactor gedurende enkele dagen droog heeft gedaan. Droog staan van de reactor gedurende enkele uren heeft geen merkbare invloed op het denitrificatieproces. Wanneer het systeem uitsluitend met recirculatie wordt bedreven, blijft de biologische activiteit tenminste een maand in de reactor aanwezig.

Het denitrificerend fluidbedstelsysteem functioneert goed als wordt voldaan aan de volgende criteria:

- vastbedhoogte 2,1 meter;
- fluidbedhoogte ongeveer 3 meter;
- de totale hoeveelheid vaste stof (zand en biomassa) in het fluidbed is bovenin minimaal 300 kg/m^3 en onderin 700 tot 1000 kg/m^3 ;
- de plaatselijke vastbed/fluidbed-verhouding bepaald aan een monster, dat gedurende 5 minuten is bezonken, is bovenin het fluidbed minimaal 0,45-0,50 en onderin maximaal 0,70-0,80;
- de verdeling van de hoeveelheid vaste stof (zand en biomassa) over de hoogte van het fluidbed blijft ongeveer constant in de tijd;

- de concentratie biomassa in het fluidbed is maximaal 25 kg/m³.



Figuur 7
NH₄-N-hoogteprofielen in een nitrificerend vastbedstelsysteem bij een goede, een te lage en een te hoge ammoniumbelasting

Voor een gelijkmatige verdeling van zand en biomassa in de reactor is het noodzakelijk dat de zand/biomassascheiding continu plaatsvindt. Wanneer de zand/biomassascheiding batchgewijs, bijvoorbeeld dagelijks gedurende een uur, wordt uitgevoerd, moet veel biomassa van het zand worden verwijderd om weer gedurende een dag te kunnen draaien zonder uitspoeling. Hierdoor stijgt de plaatselijke vastbed/fluidbed-verhouding vaak naar 0,90 en ontstaat laagvorming in het fluidbed. De onderste laag bevat dan nauwelijks biomassa en heeft daardoor geen functie meer in het denitrificatieproces. Ter controle van de bedrijfsvoering moet de verdeling van de plaatselijke vastbed/fluidbed-verhouding wekelijks worden bepaald.

Uitspoeling van zand uit de reactor is mogelijk bij een hoeveelheid vaste stof bovenin de reactor < 300 kg/m³, maar ook doordat stikstofbelletjes zich hechten aan de begroeide zandkorrels en deze meenemen. Door het aanbrengen van een afroomschot en een duikschot kan het verlies van zand worden tegengegaan.

Een denitrificerend systeem bevat gemakkelijk en snel groeiende biomassa. Hierdoor bestaat de kans op dichtgroeien van de reactor ("clogging"), het verstopt raken van het verdeelsysteem en biomassagroei in de leidingen. Het is daarom gewenst periodiek, bijvoorbeeld één keer per twee jaar, de reactor geheel leeg te maken en alle onderdelen te controleren en schoon te maken. Een dergelijke grootonderhoudsbeurt kan binnen een week worden uitgevoerd.

Een praktisch probleem is de groei van algen bovenin het systeem bij inwerking van zonlicht. De algengroei kan worden voorkomen door de bovenzijde van de reactor af te dekken. Een ander probleem is het ontstaan van een taaie drijfslag in de recirculatietank. Een roerder in de

recirculatietank of een drijf laagafvoer gecombineerd met een batchgewijze afvoer van het bezonken slib is noodzakelijk.

4.7 Denitrificerend vastbedsysteem

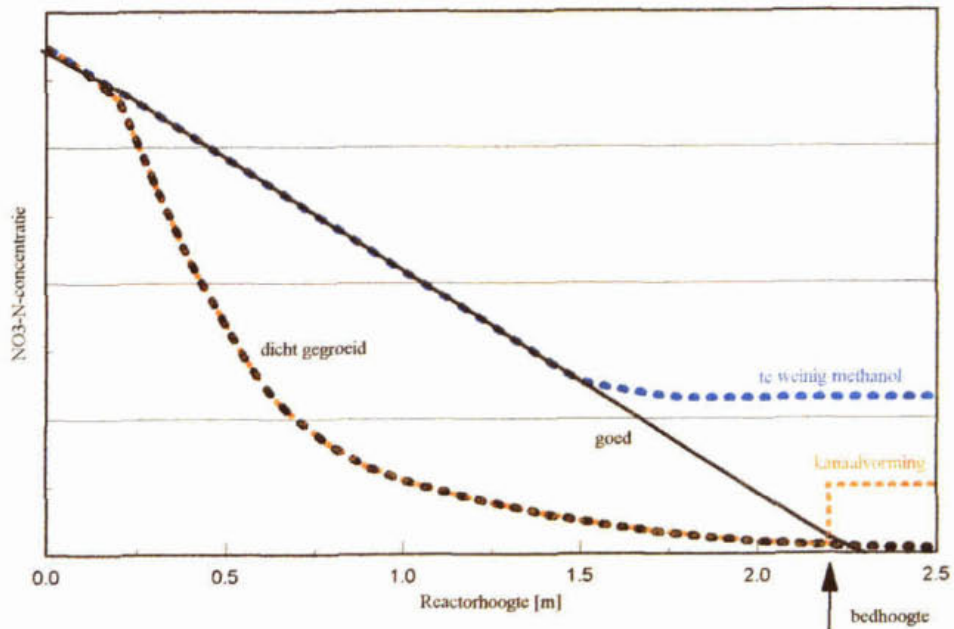
Het eerste biologische opstarten van het denitrificerend vastbedsysteem, totdat de denitrificatie stabiel is, duurde bij de proefinstallatie één à twee weken. De watertemperatuur was daarbij 18 - 20 °C. Als het systeem goed denitrificeert, is de biologische aanpassingstijd, nadat de reactor gedurende enkele dagen heeft droog gestaan, hooguit een dag. Droog staan van de reactor gedurende enkele uren heeft geen merkbare invloed op het denitrificatieproces.

Het denitrificerend vastbed is door de gemakkelijk en snel groeiende biomassa gevoelig voor dichtgroeien ("clogging"). De kans hierop is het grootst bij de invoer van methanol. Dichtgroeien heeft tot gevolg dat kanaalvorming optreedt in het bed. De schietstromen die daardoor in het bed ontstaan, doen een gedeelte van het toegevoerde water onvolledig gedenitrificeerd het systeem weer verlaten. Ook kan de drukval over het bed dusdanig hoog oplopen dat de drukbeveiliging voor de spoelcyclus wordt overschreden. Het dichtgroeien kan onder controle worden gehouden door bij een gemiddelde zwevendstofconcentratie van ongeveer 30 mg/l:

- een vastbedhoogte aan te houden van minimaal 2,2 meter bij $7 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; met toenemende hydraulische belasting kan de bedhoogte stijgen tot 3 meter bij $14 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ gemiddeld;
- de hydraulische belasting niet lager te kiezen dan gemiddeld $7 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, met een absoluut minimum van $5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$;
- een maximale hydraulische belasting aan te houden van $14 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$;
- drie keer per twee dagen het bed te spoelen;
- de methanol te doseren in een deelstroom van 80% in het bed.

Na iedere spoeling moet de drukval over het bed worden gecontroleerd. Als de drukval niet geheel is teruggekomen naar de juiste waarde, moet een extra spoeling worden uitgevoerd. Regelmatig, bijvoorbeeld één keer per maand, moet ter controle op dichtgroeien de zwevendstofconcentratie tijdens het spoelen worden gecontroleerd. Op geen enkel moment mag de concentratie zwevend stof hoger zijn dan 500 mg/l. Bij hogere concentraties moet een extra spoelcyclus worden uitgevoerd. Is het bed toch dichtgegroeid en door extra spoelingen niet meer te regenereren, dan moet de reactor worden schoongemaakt. Dit kan door het niet dichtgegroeide deel van het bed te verwijderen en het onderste, dichtgegroeide deel gedurende 36 uur aan een pH 13 bloot te stellen (een NaOH oplossing in de reactor). Tijdens deze 36 uur moet enkele keren de spoellucht door het bed worden geblazen om een goede verspreiding van de loog te garanderen. De biomassa wordt vervolgens uit het bed verwijderd door veelvuldig spoelen, waarna het dragermateriaal in de reactor wordt teruggevoerd. Het biologisch opstarten na deze schoonmaakactie duurt ongeveer een week.

De werking van het denitrificerend vastbedsysteem kan worden gecontroleerd met een $\text{NO}_3\text{-N}$ -hoogteprofiel over het bed (figuur 8). Het vastbedsysteem wordt optimaal gebruikt als de $\text{NO}_3\text{-N}$ -concentratie juist bovenin het bed de gewenste afvoerconcentratie bereikt. Uit de praktijkproeven is gebleken dat deze situatie met het denitrificerend vastbedsysteem moeilijk kan worden bereikt. Het gehele denitrificatieproces speelt zich af in de onderste 1,5 tot 2 meter van het bed (afhankelijk van de snelheid). Wanneer deze bedhoogte precies wordt aangehouden blijkt het rendement echter niet op een constant hoog niveau te houden te zijn als gevolg van schietstromen. Bij een extra bedhoogte van 0,7 meter wordt het effect van dichtgroeien tussen de spoelingen voldoende gecompenseerd en kan wel een hoog rendement worden gehandhaafd. In de situatie dat het bed te sterk is dichtgegroeid en sprake is van kanaalvorming is de concentratie $\text{NO}_3\text{-N}$ in de afvoer groter dan bovenin het bed.



Figuur 8
NO₃-N-hoogteprofielen in een denitrificerend vastbedstelsel in verschillende situaties

Tevens is het gewenst bij het instellen van de methanoldosering de nitrietconcentratie te controleren. Bij een te lage methanoldosering kan de NO₂-N-concentratie oplopen tot boven 10 mg/l.

De luchtleidingen die worden gebruikt voor het spoelen van het bed moeten iedere twee weken met water worden doorgespoeld om eventuele aangroei van biomassa te verwijderen.

5 RESULTATEN

5.1 Inleiding

De resultaten van het praktijkonderzoek zijn beschreven per systeem voorzover deze relevant zijn voor het opstellen van ontwerprichtlijnen voor de Nederlandse praktijk. Alle gepresenteerde grafieken zijn samengesteld op basis van gefiltreerde monsters, met uitzondering van de grafieken die betrekking hebben op zwevend stof. Hiervoor is gekozen, omdat het effluent van de rwzi Houtrust relatief veel zwevend stof bevat. De zwevendstofverwijdering in de vastbedsystemen zou daardoor, bij gebruik van ongefiltreerde monsters, een significante invloed hebben op de resultaten. Als in deze rapportage wordt gesproken over zwevend stof, wordt daarmee bedoeld de totale hoeveelheid onopgeloste stof bepaald volgens NEN 6621. De belastingen zijn berekend per m³ vastbed of fluidbed. De resultaten van het door TNO (IMW) uitgevoerde biofilmonderzoek zijn per systeem beschreven als onderdeel van de resultaten.

5.2 Nitrificerend vastbedsysteem

5.2.1 Inleiding

In tabel 5 zijn de parameters weergegeven van de aanvoer en de afvoer van het nitrificerend vastbedsysteem. Hierin valt op dat de pH in geringe mate stijgt, terwijl als gevolg van het nitrificatieproces een sterke daling zou worden verwacht. Het pH-effect van de nitrificatie wordt teniet gedaan door het pH-effect van het strippen van CO₂. Het effluent van de rwzi Houtrust bevat relatief veel bicarbonaat door het gebruik van zuivere zuurstof in een volledig afgedekte beluchting. Wanneer minder CO₂ kan worden gestript of de alkaliteit onvoldoende is, moet loog worden gedoseerd om de pH op een niveau van tenminste 6,5 te handhaven. De alkaliteit van de aanvoer varieerde tussen 1,2 en 10,8 meq/l (als OH⁻).

De voor nitrificatie benodigde alkaliteit bedraagt 0,142 meq/mg NH₄-N.

Tabel 5

Parameters van de aanvoer en de afvoer van het nitrificerend vastbedsysteem over de gehele proefperiode

parameter	aanvoer nitrificerend vastbed		afvoer nitrificerend vastbed	
	spreiding (mg/l) of *(meq/l)	gemiddeld (mg/l) of *(meq/l)	spreiding (mg/l) of *(meq/l)	gemiddeld (mg/l) of *(meq/l)
CZV _{totaal}	45 - 730	125	32 - 353	87
CZV _{gefiltreerd}	34 - 193	79	28 - 189	68
BZV _{5 totaal}	3 - 106	24	2 - 98	11
BZV _{5 gefiltreerd}	2 - 21	7	1 - 18	5
N _{Kj totaal}	16 - 130	48	0,7 - 77	14
N _{Kj gefiltreerd}	3 - 87	43	0,2 - 49	12
NH ₄ -N	25 - 57	46	0,07 - 61	10
NO _x -N	0 - 42	4	0,13 - 60	20
NO ₂ -N	0 - 3,7	0	<0,1 - 4,5	1
ortho-P	1,0 - 8,2	4	1,0 - 8,5	4
P _{totaal}	2 - 15	5	1,4 - 11	5
zwevend stof	6 - 213	51	2,2 - 177	28
alkaliteit	*1,0 - 10,8	*2,0	*1,0 - 9,8	*4,0
pH	5,2 - 8,0	6,5	6,3 - 8,3	7,0
temperatuur	10,5 - 16,3	14,8	11,0 - 21,9	16,0
BZV _{5 gefiltreerd} /NH ₄ -N	0,05 - 1,50	0,15	0,17 - 27,8	2

De proefperiode kan voor het nitrificerende vastbedstelsysteem worden verdeeld in twee periodes, 1992 en 1993. In 1992 was de hydraulische belasting laag, meestal rond $2 \text{ m}^3/(\text{m}^2.\text{h})$. Hierdoor was het bed onderin dichtgeslibd met zwevend stof, biomassa en wormen. Tijdens de vorst rond de jaarwisseling heeft de installatie enige dagen stil gestaan met als gevolg dat daarna het bed voor een belangrijk deel is schoon gespoeld. Dit had direct een gunstig effect op de prestaties van het systeem. Deze betere prestaties zijn in stand gehouden, doordat in 1993 het bed iedere 10 dagen intensiever is gespoeld, en doordat het systeem met hogere hydraulische belastingen is bedreven. Vanwege het significant verschillend functioneren wordt bij de beschrijving van de resultaten, indien relevant, onderscheid gemaakt naar 1992 en 1993.

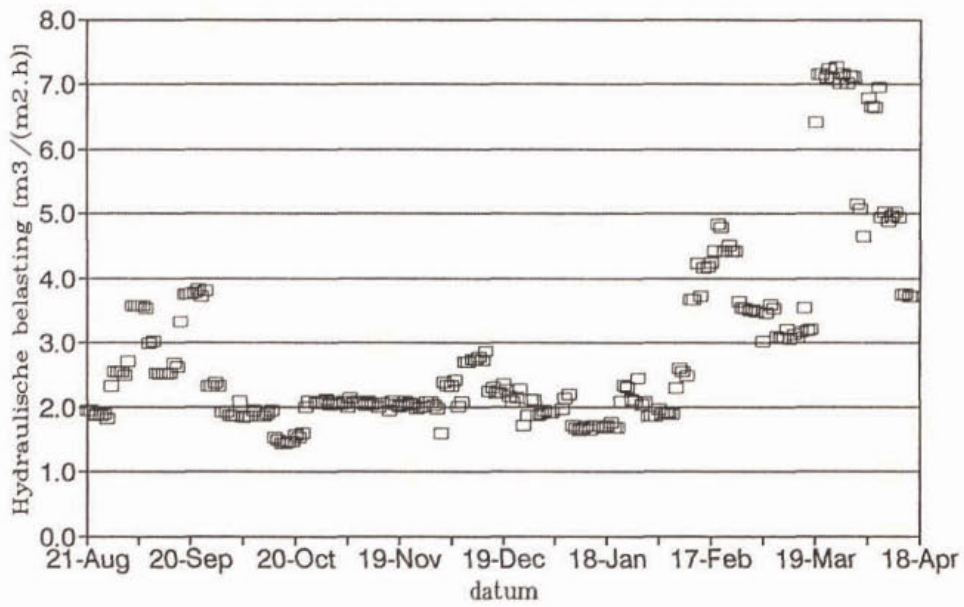
Daarnaast blijken de prestaties van het nitrificerend vastbedstelsysteem afhankelijk te zijn van de hydraulische belasting en van de temperatuur (paragraaf 5.2.2 en 5.2.3). Uit de resultaten blijkt de afhankelijkheid van de hydraulische belasting geen indirect effect te zijn van de pH. Waarschijnlijk worden de afnemende prestaties bij afnemende hydraulische belasting veroorzaakt door ophoping van zwevend stof. Deze ophoping van zwevend stof bemoeilijkt de aan- en afvoer van stoffen naar en van de nitrificerende biofilm op het dragermateriaal. Bij de heersende BZV/N-verhouding (tabel 5) blijkt het nitrificatieproces niet te worden geremd door de groei van heterotrofe bacteriën.

5.2.2 *Hydraulische belasting*

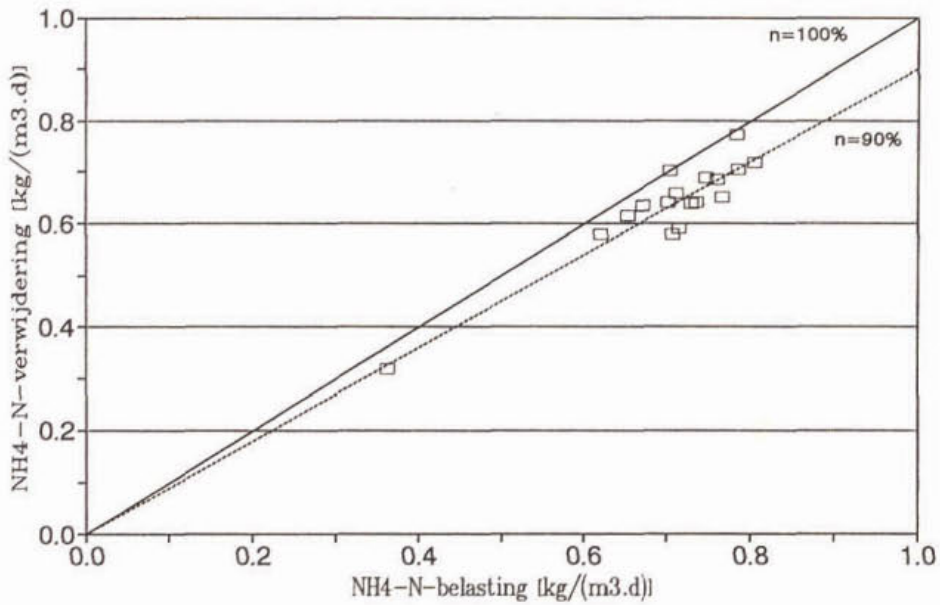
Figuur 9 geeft de variatie van hydraulische belastingen tijdens de proefperiode. De invloed van de hydraulische belasting is nagegaan door voor verschillende hydraulische belastingen de ammoniumverwijdering als functie van de ammoniumbelasting uit te zetten (figuur 10, 11 en 12). De resultaten zijn samengevat in tabel 6. Op grond van de hogere maximale $\text{NH}_4\text{-N}$ -verwijdering bij hoge hydraulische belastingen wordt bij de presentatie van de resultaten onderscheid gemaakt in een hydraulische belasting $< 4 \text{ m}^3/(\text{m}^2.\text{h})$ en een hydraulische belasting $> 4 \text{ m}^3/(\text{m}^2.\text{h})$.

Tabel 6
Resultaten van het nitrificerend vastbedstelsysteem bij verschillende hydraulische belastingen, 1993

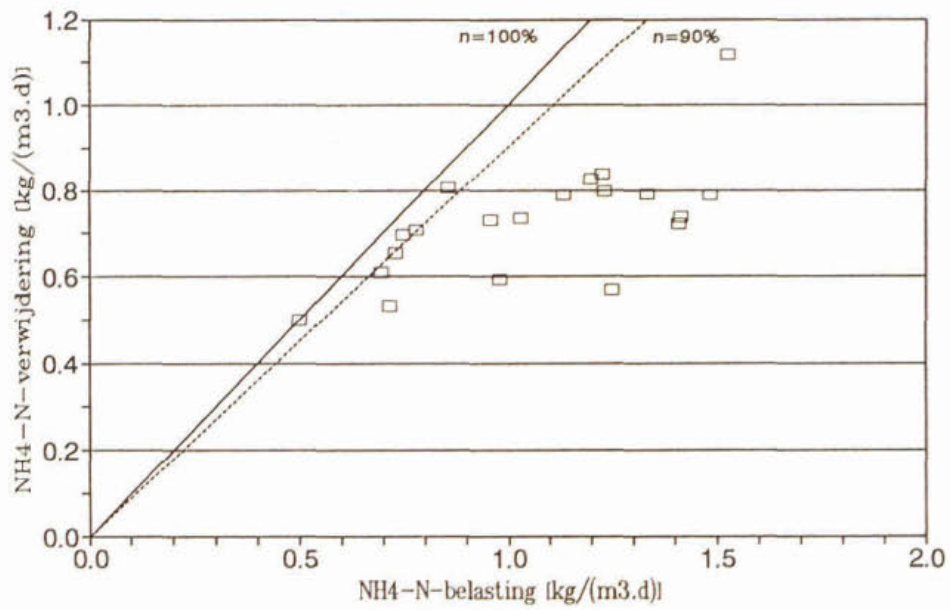
hydraulische belasting [$(\text{m}^3/(\text{m}^2.\text{h}))$]	maximale $\text{NH}_4\text{-N}$ -verwijdering [$\text{kg}/(\text{m}^3.\text{d})$]
< 2	0,8
2 - 4	0,6 - 0,8
> 4	0,6 - 1,0



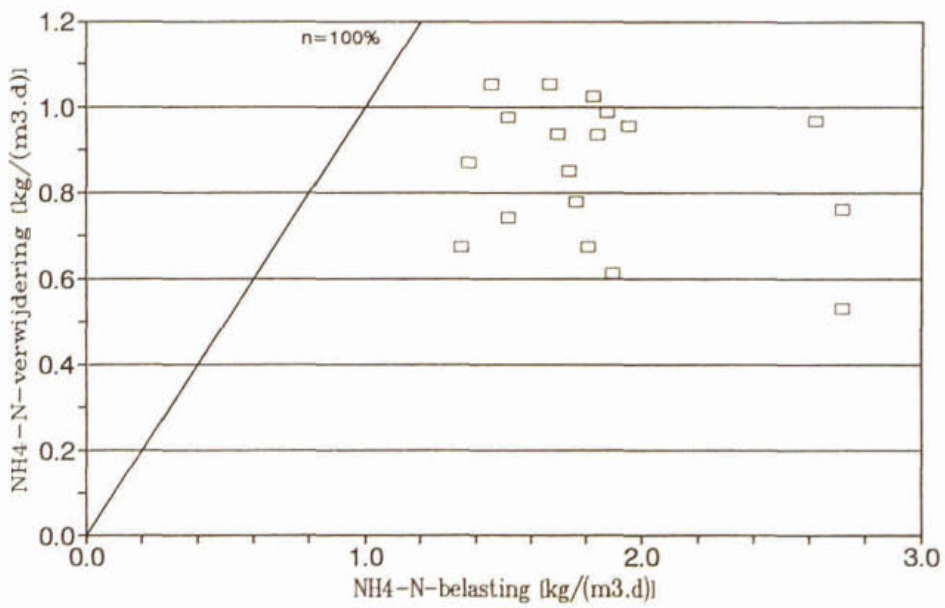
Figuur 9
De hydraulische belasting van het nitrificerend vastbedstelsysteem gedurende de proefperiode



Figuur 10
De $\text{NH}_4\text{-N}$ -verwijdering als functie van de $\text{NH}_4\text{-N}$ -belasting van het nitrificerend vastbedstelsysteem; hydraulische belasting $< 2 \text{ m}^3/(\text{m}^2.\text{h})$, temperatuur $14 - 15 \text{ }^\circ\text{C}$, 1993



Figuur 11
 De $\text{NH}_4\text{-N}$ -verwijdering als functie van de $\text{NH}_4\text{-N}$ -belasting van het nitrificerend vastbedstelsysteem; hydraulische belasting 2 - 4 $\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, temperatuur 14 - 15 °C, 1993



Figuur 12
 De $\text{NH}_4\text{-N}$ -verwijdering als functie van de $\text{NH}_4\text{-N}$ -belasting van het nitrificerend vastbedstelsysteem; hydraulische belasting > 4 $\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, temperatuur 14 - 15 °C, 1993

5.2.3 *Temperatuur*

De invloed van de temperatuur op de $\text{NH}_4\text{-N}$ -verwijdering van het nitrificerend vastbedsysteem is weergegeven in de figuren 12 tot en met 15.

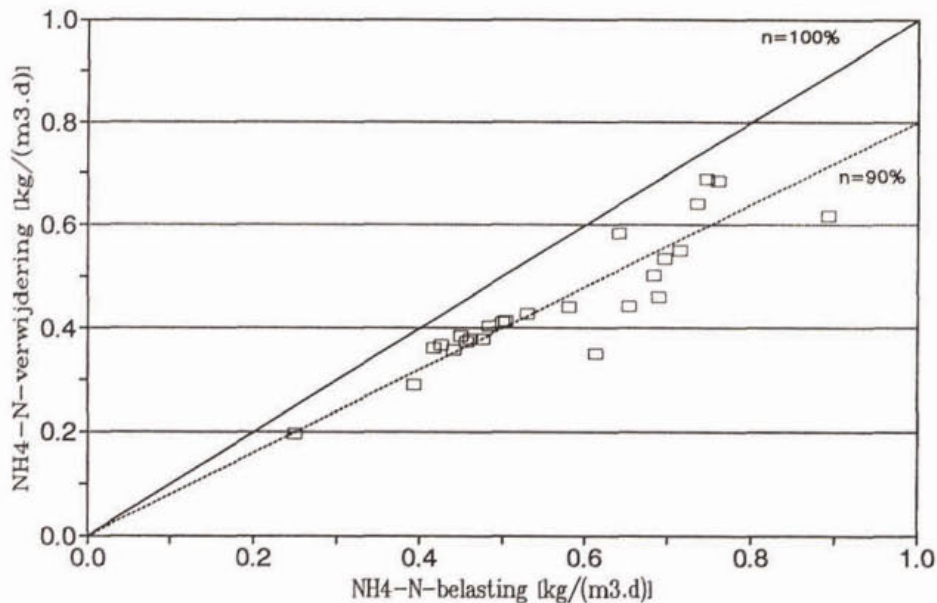
De resultaten bij verschillende temperaturen zijn samengevat in tabel 7. Hierbij is onderscheid gemaakt naar periode en naar hydraulische belasting.

Tabel 7

Resultaten van het nitrificerend vastbedsysteem bij verschillende temperaturen

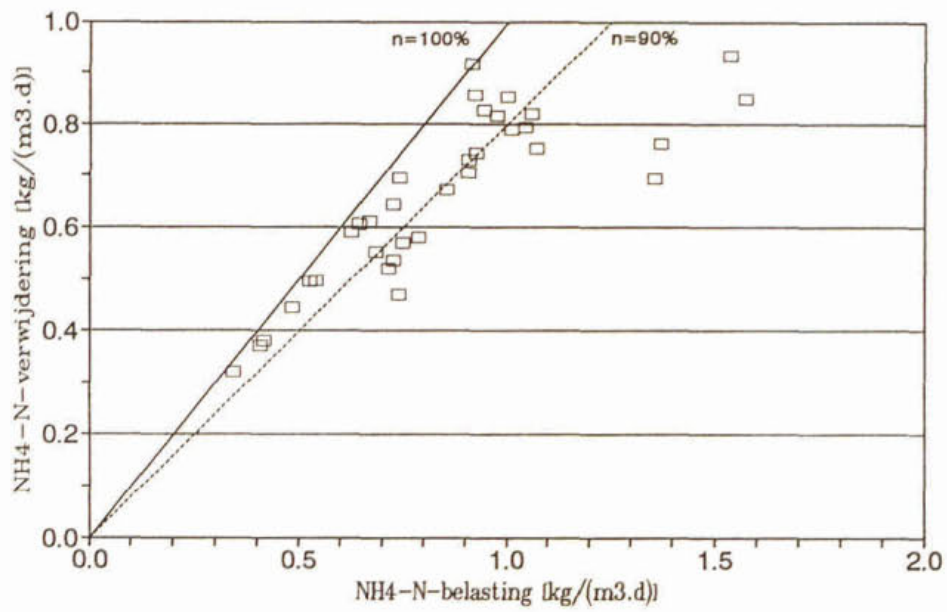
temperatuur [°C]	periode	hydraulische belasting [m ³ /(m ² .h)]	maximale NH ₄ -N-verwijdering [kg/(m ³ .d)]
14 - 15	1992	< 4	0,5 - 0,7
> 20	1992	< 4	0,7 - 0,9
14 - 15	1993	< 4	0,6 - 0,8
14 - 15	1993	> 4	0,6 - 1,0

Het rendement bij lage $\text{NH}_4\text{-N}$ belastingen (0,7 tot 1,1 kg/(m³.d) afhankelijk van temperatuur en hydraulische belasting) is ongeveer 80% in 1992 en ongeveer 90% in 1993. Zoals reeds opgemerkt in paragraaf 5.2.1 zijn de betere resultaten in 1993 na het uitspoelen van de grote hoeveelheid zwevend stof, biomassa en wormen uit het bed.

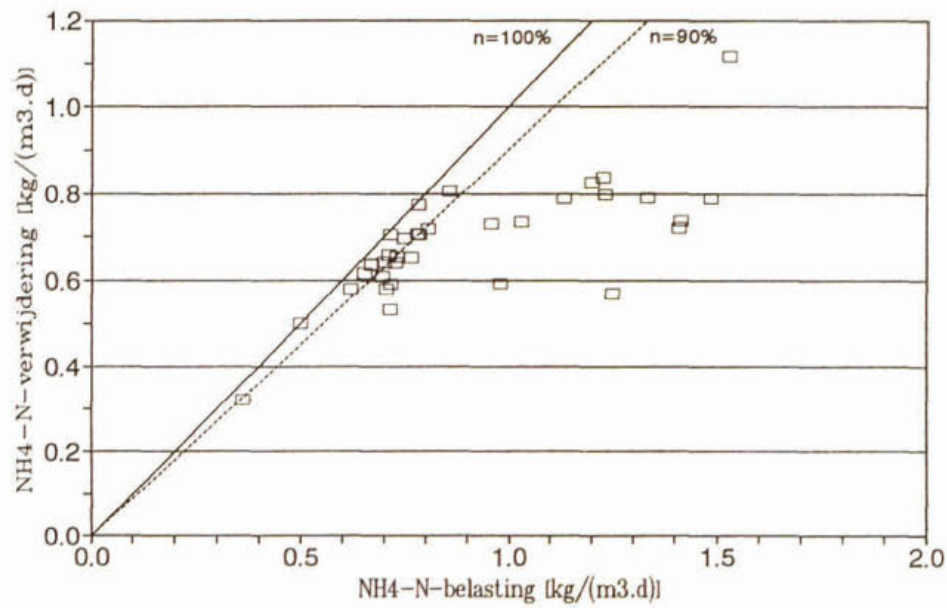


Figuur 13

De $\text{NH}_4\text{-N}$ -verwijdering als functie van de $\text{NH}_4\text{-N}$ -belasting van het nitrificerend vastbedsysteem; hydraulische belasting < 4 m³/(m².h), temperatuur 14-15°C, 1992



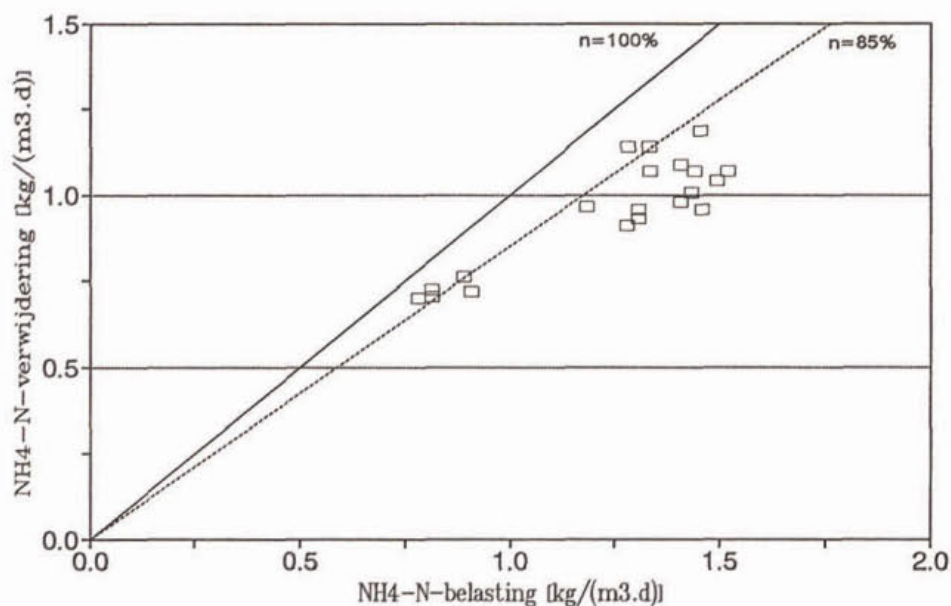
Figuur 14
 De $\text{NH}_4\text{-N}$ -verwijdering als functie van de $\text{NH}_4\text{-N}$ -belasting van het nitrificerend vastbedstelsysteem; hydraulische belasting $< 4 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, temperatuur $> 20^\circ\text{C}$, 1992



Figuur 15
 De $\text{NH}_4\text{-N}$ -verwijdering als functie van de $\text{NH}_4\text{-N}$ -belasting van het nitrificerend vastbedstelsysteem; hydraulische belasting $< 4 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, temperatuur 15°C , 1993

5.2.4 Variabel debiet

Gedurende enkele weken in 1993 is het debiet over de dag gevarieerd. De hydraulische belasting in deze periode was kleiner dan $4 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. Uit figuur 16 blijkt dat in deze periode de maximale $\text{NH}_4\text{-N}$ -verwijdering varieerde van 0,9 tot 1,2 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$. Deze verwijdering is, in tegenstelling tot de verwachtingen, significant hoger dan bij constant debiet onder dezelfde condities (0,6 tot 0,8 $\text{kg NH}_4\text{-N}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, zie figuur 15). Het rendement bij lage $\text{NH}_4\text{-N}$ belastingen ligt maximaal op ongeveer 85% en is daarmee iets lager dan bij een constant debiet in een goed functionerend systeem.

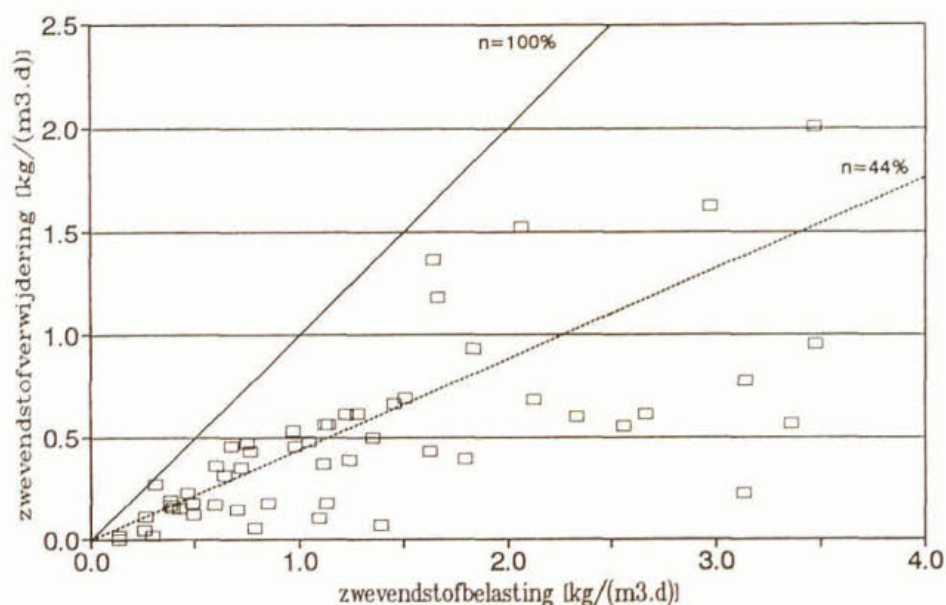


Figuur 16

De $\text{NH}_4\text{-N}$ -verwijdering als functie van de $\text{NH}_4\text{-N}$ -belasting van het nitrificerend vastbedstelsysteem bij variabel debiet; hydraulische belasting $< 4 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, temperatuur $14\text{-}15^\circ\text{C}$, 1993

5.2.5 Zwevend stof

Bij een gemiddelde aanvoerconcentratie zwevend stof van 51 mg/l tijdens het praktijkonderzoek heeft het nitrificerend vastbedstelsysteem gemiddeld 23 mg/l verwijderd. Dit komt overeen met een gemiddelde zwevendstofverwijdering van 44% (figuur 17).



Figuur 17

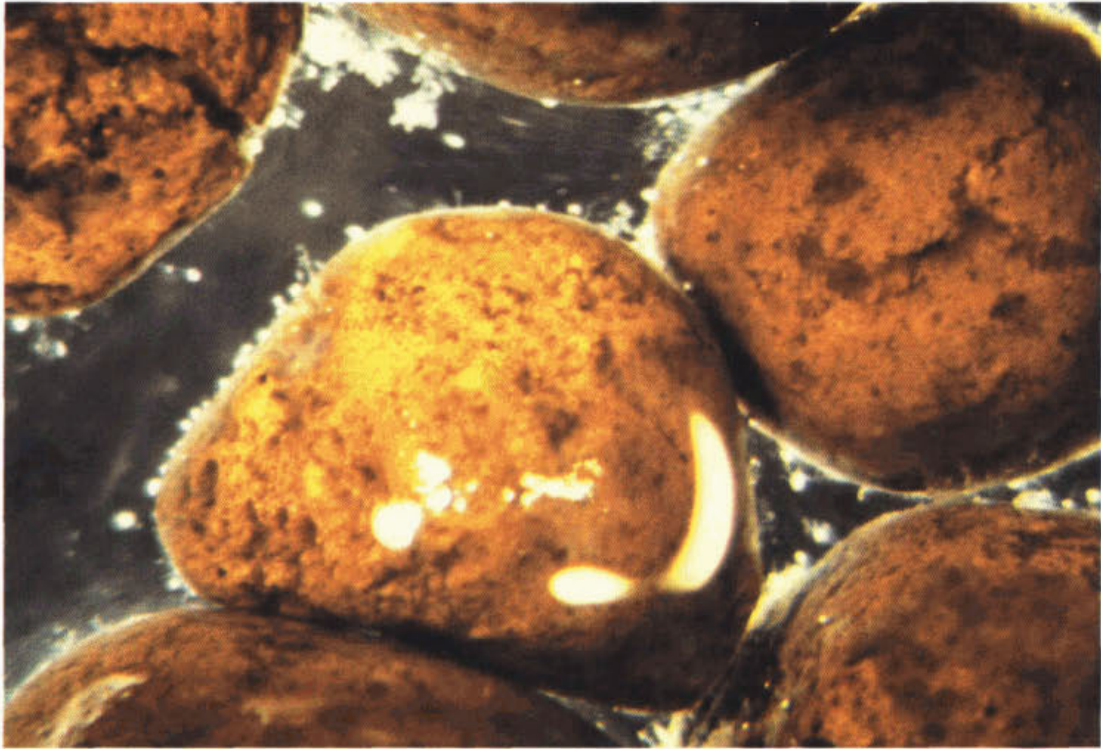
De zwevendstofverwijdering als functie van de zwevendstofbelasting van het nitrificerend vastbedstelsysteem; temperatuur 14 - 15 °C, 1993

5.2.6 Slibproductie

Voor de berekening van de slibproductie zijn gedurende 11 spoelcycli monsters genomen van het spoelwater. Hieruit blijkt dat gemiddeld 1,0 kg d.s. wordt uitgespoeld per kg $\text{NH}_4\text{-N}$ die in de perioden voor de betreffende spoelcycli is verwijderd. Het uitgespoelde slib bestaat voor een deel uit bacteriën die in het nitrificerend vastbedstelsysteem zijn geproduceerd. Een ander deel wordt gevormd door het afgevangen zwevend stof. Uit de analyses van de dagmonsters blijkt, dat in de perioden voorafgaand aan de gemeten spoelcycli gemiddeld 0,08 kg d.s. is afgevangen per kg $\text{NH}_4\text{-N}$ die is verwijderd. Dit zou betekenen dat ruim 0,9 kg d.s./kg N moet worden toegeschreven aan de productie van bacteriën. Dit is zes keer hoger dan de theoretische slibproductie (0,16 kg d.s./kg N_{verw}) en bijna vier keer hoger dan de door Degré-mont opgegeven slibproductie (0,25 kg d.s./kg N_{verw}) van nitrificerend slib. Bij beschouwing van de gehele proefperiode wordt, bij een gemiddelde $\text{NH}_4\text{-N}$ -concentratie van 40 mg/l en een gemiddelde zwevendstofconcentratie van 51 mg/l, echter gemiddeld 23 mg/l zwevendstof teruggehouden, dus 0,5 kg/kg N_{verw} . Uitgaande van deze cijfers is de productie van bacteriën 0,5 kg d.s./kg N_{verw} en ligt veel dicht bij de verwachtingen.

5.2.7 Biofilmonderzoek

Het dragermateriaal in het nitrificerend vastbedstelsysteem is bedekt met een zeer dunne biofilm (figuur 18). Daarnaast zijn veel ciliaten gehecht aan het oppervlak. In de onderste helft van de reactor is de biofilm iets dikker. Bovendien is zwevend stof als vlokken aanwezig naast veel aquatische wormen. Ook onder de filtervloer zijn veel aquatische wormen aanwezig in het systeem.



Figuur 18
Stereomicroscopische opname van dragermateriaal uit het nitrificerend vastbedsysteem (deeltjesgrootte 3 tot 6 mm)

5.3 Denitrificerend fluidbedsysteem

5.3.1 Inleiding

In tabel 8 zijn de parameters weergegeven van de aanvoer en de afvoer van het denitrificerend fluidbedsysteem. De resultaten van het onderzoek geven geen aanleiding de proefperiode te onderscheiden naar verschillende situaties.

Tabel 8

Parameters van de aanvoer en de afvoer van het denitrificerend fluidbedsysteem over de gehele proefperiode

parameter	aanvoer denitrificerend fluidbed		afvoer denitrificerend fluidbed	
	spreiding (mg/l) of *(meq/l)	gemiddeld (mg/l) of *(meq/l)	spreiding (mg/l) of *(meq/l)	gemiddeld (mg/l) of *(meq/l)
CZV _{total}	32 - 353	87	46 - 236	101
CZV _{gefilterd}	28 - 189	68	28 - 153	71,8
BZV _{5 total}	2 - 98	11	1 - 100	16
BZV _{5 gefilterd}	1 - 18	5	2 - 84	6,7
N _{Kj total}	0,7 - 77	14	1,4 - 57	14
N _{Kj gefilterd}	0,2 - 49	12	0,2 - 57	12
NH ₄ -N	0,07 - 61	10	0,05 - 45	8,5
NO _x -N	0,13 - 60	20	0,04 - 42	6,9
NO ₂ -N	<0,1 - 4,5	1	<0,1 - 9,3	0,76
o-P	1 - 8,5	4	0,71 - 7,1	3,5
P _{total}	1,4 - 11	5	1,3 - 8,7	4,5
zwevend stof	2,2 - 177	28	1 - 199	37,2
alkaliteit	*1,0 - 9,8	*4,0	*1,7 - 8,8	*5,3
pH	6,3 - 8,3	7,0	6,5 - 7,7	7,2
temperatuur	11,0 - 21,9	16,0	12,8 - 22	16,3

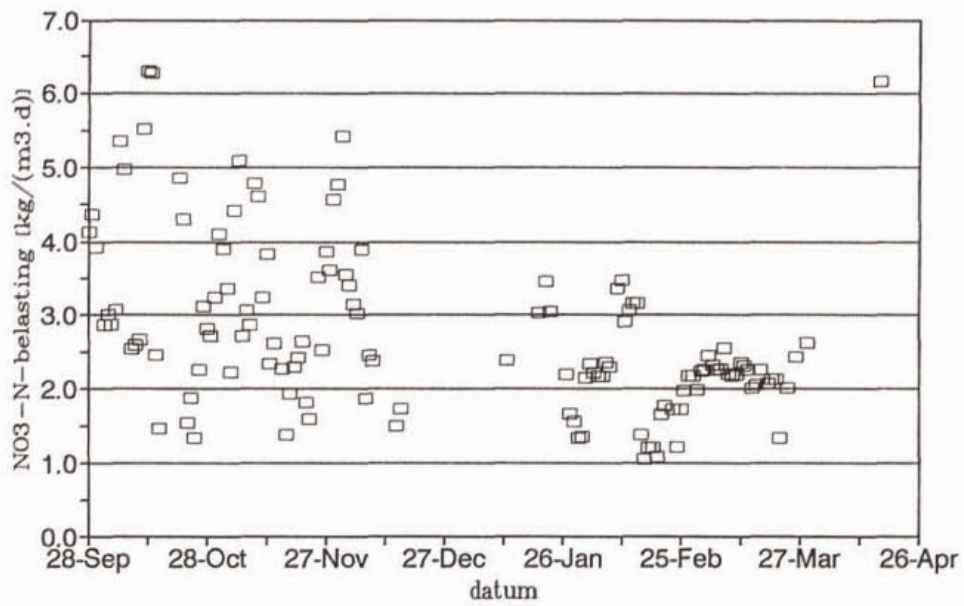
5.3.2 Nitraatverwijdering

Uit figuur 19 blijkt dat de nitraatbelasting van het denitrificerend fluidbedsysteem gedurende de proefperiode sterk fluctueerde tussen 1 en 6 kg NO₃-N/(m³.d). De hoogste nitraatbelasting is ruim drie keer de door Dorr-Oliver opgegeven ontwerpbelasting (1,8 kg NO₃-N/(m³.d)). Het rendement van de nitraatverwijdering bedraagt 95% bij alle gemeten belastingen in de gehele proefperiode (figuur 20). Hieruit kan worden geconcludeerd dat nitraatverwijdering van het denitrificerend fluidbedsysteem niet wordt beïnvloed door:

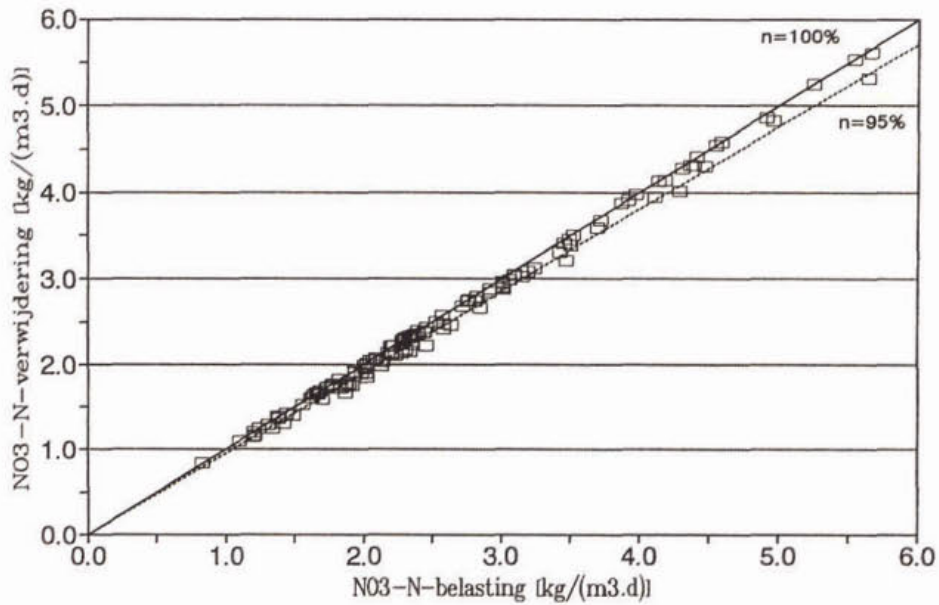
- temperatuurwisselingen tussen 11 en 22 °C;
- belastingwisselingen tussen 1 en 6 kg NO₃-N/(m³.d).

Tijdens de proefperiode ontstonden problemen met de bedrijfsvoering bij langdurig hoge nitraatbelastingen. Het bleek niet mogelijk onder die condities langdurig aan de randvoorwaarden te voldoen (zie paragraaf 4.6.).

Niet duidelijk is geworden of kan worden voldaan aan de randvoorwaarden voor een goede bedrijfsvoering bij nitraatbelastingen die continu boven de door Dorr-Oliver opgegeven ontwerpbelasting liggen. Verdergaande praktijkproeven zijn nodig om te kunnen vaststellen welke gemiddelde nitraatbelasting maximaal kan worden aangehouden zonder problemen met de bedrijfsvoering.



Figuur 19
De NO₃-N-belasting van het denitrificerend fluidbedsysteem gedurende de proefperiode

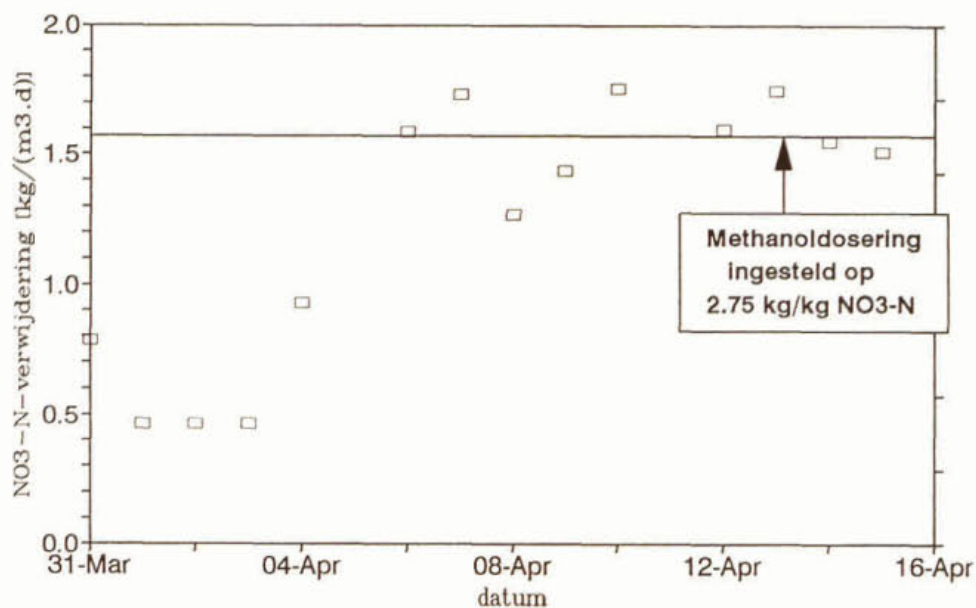


Figuur 20
De NO₃-N-verwijdering als functie van de NO₃-N-belasting van het denitrificerend fluidbedsysteem

5.3.3 Methanol

Het denitrificerend fluidbedsysteem gebruikt onder de proefomstandigheden (gemiddeld 19 mg $\text{NO}_3\text{-N/l}$) 2,75 kg methanol per kg verwijderde $\text{NO}_3\text{-N}$. Dit wordt bevestigd door figuur 21 waar de nitraatverwijdering is weergegeven over de periode waarin een beperkte hoeveelheid methanol is gedoseerd. De methanoldosering is vast ingesteld voor de verwijdering van 1,6 kg $\text{NO}_3\text{-N}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$. De schommelingen in nitraatverwijdering zijn te wijten aan de variaties in de methanoldosering door de bij de proefinstallatie gebruikte apparatuur. De achterblijvende nitraatverwijdering tot 5 april is het gevolg van het biologisch opstarten van het systeem na een schoonmaakactie.

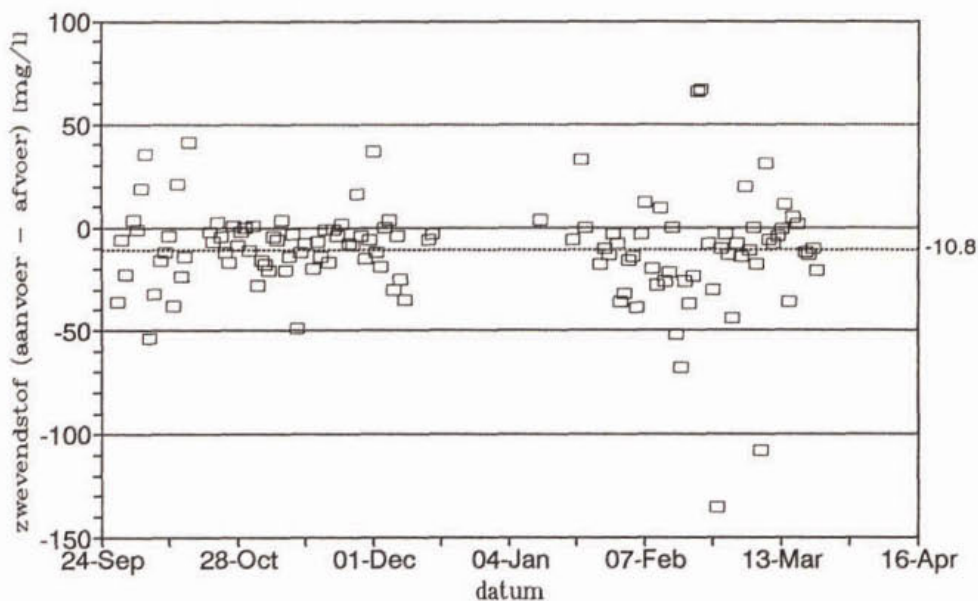
De methanolconcentratie gemeten in enkele steekmonsters van de afvoer varieert van $< 0,1$ tot 1 mg/l met uitschieters naar 5 mg/l. De overstort en de daaropvolgende kleine cascade bovenin de denitrificerende fluidbedreactor strippen deze methanol voor een belangrijk deel uit het water. De methanolconcentratie gemeten in enkele steekmonsters afkomstig van achter de cascade ligt onder de detectiegrens van 0,1 mg/l.



Figuur 21
De $\text{NO}_3\text{-N}$ -verwijdering van het denitrificerend fluidbedsysteem bij een vaste methanoldosering van 2,75 kg/kg $\text{NO}_3\text{-N}$ voor 1,6 kg $\text{NO}_3\text{-N}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$, gedurende de proefperiode

5.3.4 Zwevend stof

Het denitrificerend fluidbedsysteem verwijdert geen zwevend stof; het heeft in de afvoer gemiddeld een ongeveer 10 mg/l hogere zwevendstofconcentratie dan in de aanvoer van het systeem (figuur 22).



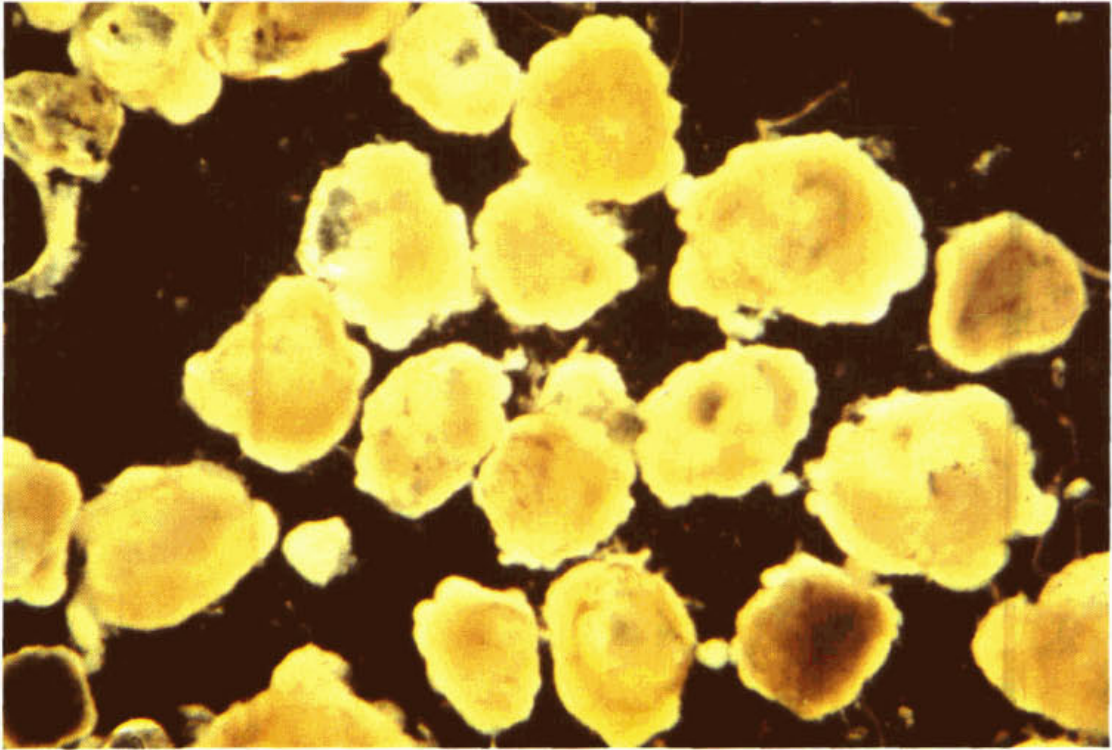
Figuur 22
 Het verschil in zwevendstofconcentratie van aanvoer en afvoer van het denitrificerend fluidbedsysteem gedurende de proefperiode

5.3.5 Slibproductie

De berekening van de slibproductie is gebaseerd op metingen gedurende vier batchgewijze zand/biomassascheidingen. Hieruit blijkt dat bij de zand/biomassascheiding gemiddeld 0,4 kg d.s. is afgevoerd per kg $\text{NO}_3\text{-N}$ die in de perioden voorafgaand aan de betreffende zand/biomassascheidingen is verwijderd. Dit is lager dan de theoretische slibproductie van denitrificerend slib (0,52 kg d.s./kg N_{verw}) en veel lager dan de door Dorr-Oliver opgegeven waarde (1 kg d.s./kg $\text{NO}_3\text{-N}_{\text{verw}}$). Een deel van het geproduceerde slib wordt met het gedenitrificeerde water afgevoerd. In de perioden voorafgaand aan de gemeten zand/biomassascheiding bedroeg het verschil tussen afvoer en aanvoer gemiddeld 0,4 kg d.s./kg N_{verw} . Daarmee komt de totale slibproductie van het denitrificerend fluidbedsysteem op 0,8 kg d.s./kg N_{verw} . Dit is ruim 50% hoger dan de theoretische slibproductie.

5.3.6 Biofilmonderzoek

De denitrificerende biomassa is in een compacte bloemkoolachtige structuur aanwezig op het zand in het denitrificerend fluidbedsysteem (figuur 23). De schuifkrachten in het zand/biomassascheidingsysteem zijn noodzakelijk om de biomassa van het zand te verwijderen. Wanneer de zand/biomassascheiding één keer per dag gedurende een uur plaatsvindt, is onderin de reactor nauwelijks biomassa meer aanwezig op het zand. Tijdens continue zand/biomassascheiding is de biofilm veel dunner dan bij batchgewijze scheiding. De hoeveelheid zwevend stof in het monster is bij continue scheiding juist groter. Met name bovenin de reactor zijn veel sessiele ciliaten aanwezig.



Figuur 23
Stereomicroscopische opname van het dragermateriaal uit het denitrificerend fluidbedsysteem (deeltjes-
grootte 0,3 tot 0,5 mm)

5.4 Denitrificerend vastbedsysteem

5.4.1 Inleiding

In tabel 9 zijn de parameters van de aanvoer en de afvoer van het denitrificerend vastbedsysteem weergegeven. Het praktijkonderzoek met het denitrificerend vastbedsysteem is uitgevoerd onder wintercondities, zodat de invloed van de temperatuur niet kon worden nagegaan. Op basis van de resultaten van het denitrificerend fluidbedsysteem wordt verwacht dat de temperatuur geen merkbare invloed zal hebben op de resultaten in het gebied van 11 tot 22°C. De proefperiode wordt opgesplitst in een periode met een methanoldosering van 2,75 kg/kg NO₃-N (tot en met maart 1993) en een periode met een methanoldosering van 2,85 kg/kg NO₃-N (april 1993). De resultaten geven geen aanleiding de resultaten naar andere parameters te onderscheiden.

Tabel 9

Parameters van de aanvoer en de afvoer van het denitrificerend vastbedsysteem over de gehele proefperiode

parameter	aanvoer denitrificerend vastbed		afvoer denitrificerend vastbed	
	spreiding (mg/l) of *(meq/l)	gemiddeld (mg/l) of *(meq/l)	spreiding (mg/l) of *(meq/l)	gemiddeld (mg/l) of *(meq/l)
CZV _{total}	32 - 353	87	27 - 447	90
CZV _{gefiltreerd}	28 - 189	68	30 - 435	82
BZV _{5 total}	2 - 98	11	1 - 150	11
BZV _{5 gefiltreerd}	1 - 18	5	1 - 110	6,7
N _{Kj total}	0,7 - 77	14	0,6 - 43	12
N _{Kj gefiltreerd}	0,2 - 49	12	0,8 - 40	11
NH ₄ ⁺ -N	0,07 - 61	10	0,05 - 58	8
NO ₂ ⁻ -N	0,13 - 60	20	0,05 - 51	11,4
NO ₃ ⁻ -N	<0,1 - 4,5	1	<0,1 - 15	1,9
o-P	1 - 8,5	4	0,38 - 9,1	3,3
P _{total}	1,4 - 11	5	1,0 - 7,4	3,9
zwevend stof	2,2 - 177	28	2,8 - 125	18
alkaliteit	*1,0 - 9,8	*4,0	*1,9 - 8,9	*5,0
pH	6,3 - 8,3	7,0	6,8 - 7,3	7,2
temperatuur	11,0 - 21,9	16,0	10,4 - 21,7	14,8

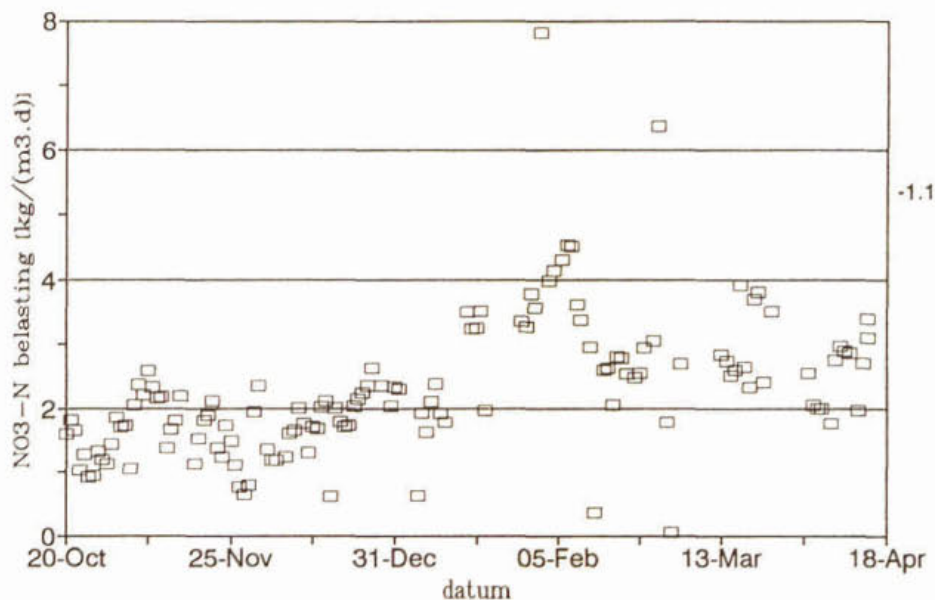
5.4.2 Nitraatverwijdering

Uit figuur 24 blijkt dat de nitraatbelasting van het denitrificerend vastbedsysteem gedurende de proefperiode sterk fluctueerde tussen 1,0 en 4,5 kg NO₃-N/(m³.d) met uitschieters naar 0,1 en 7,8 kg NO₃-N/(m³.d). Een belasting van 4,5 kg NO₃-N/(m³.d) is 2,5 keer de door Degrèmont opgegeven ontwerpbelasting (1,8 kg NO₃-N/(m³.d)). Het rendement van de nitraatverwijdering varieert bij een methanoldosering van 2,75 kg/kg NO₃-N van ongeveer 80% tot bijna 100% voor het gehele gebied van gemeten belastingen (figuur 25). De grote variatie in rendement wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de iets te lage methanoldosering. Ook de belastingwisselingen kunnen het rendement negatief hebben beïnvloed.

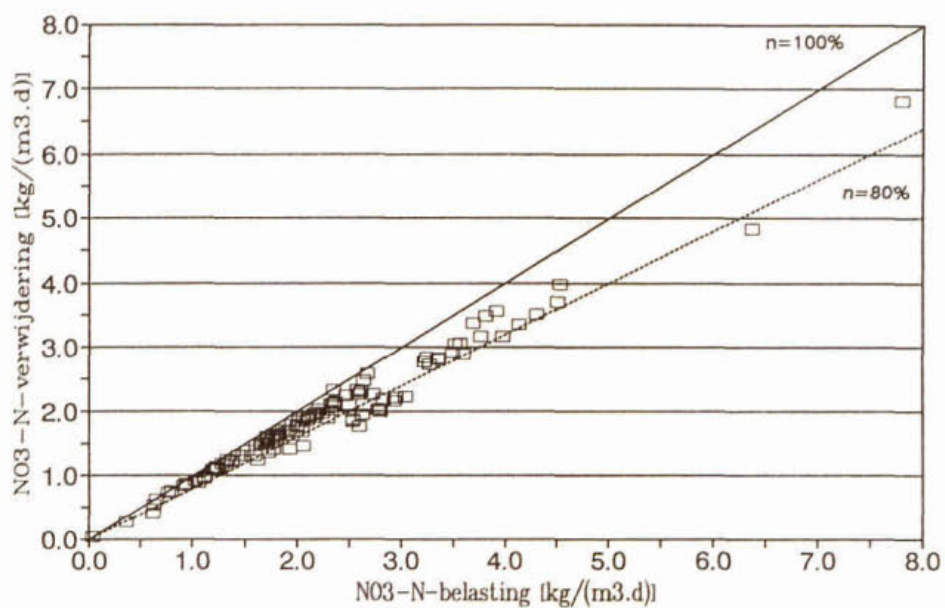
Verhoging van de methanoldosering naar 2,85 kg/kg NO₃-N geeft een verhoging van het rendement tot ongeveer 95% (figuur 26).

Als ontwerpbelasting moet vooralsnog maximaal gemiddeld 1,8 kg NO₃-N/m³.d worden aangehouden. Gedurende de praktijkproeven is gebleken dat bij langdurig hoge nitraatbelastingen bij minimale hydraulische belasting het bed dicht groeide met biomassa, waardoor kanaalvorming ontstond. Verdergaande praktijkproeven zijn nodig om vast te stellen welke

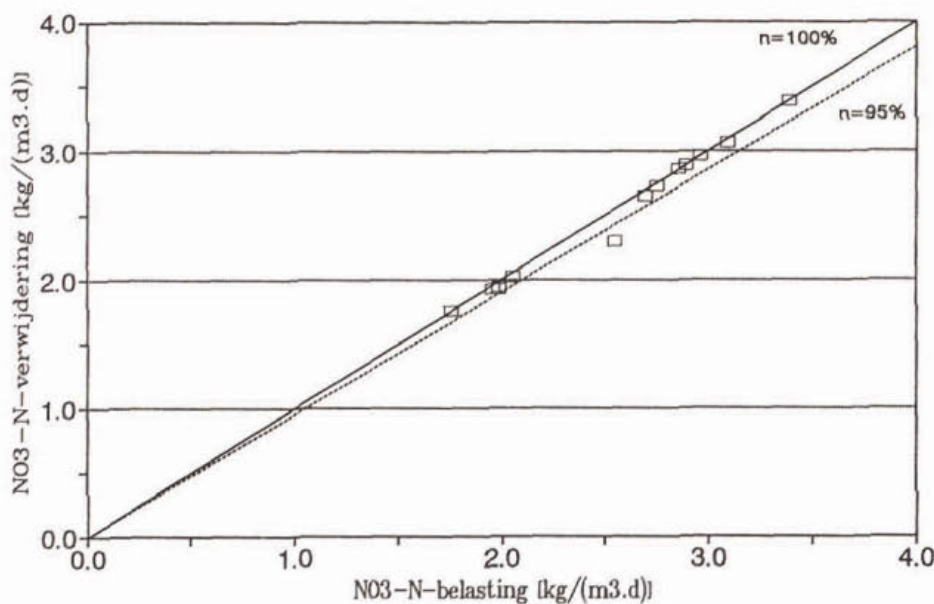
gemiddelde belasting maximaal kan worden aangehouden zonder problemen met de bedrijfsvoering.



Figuur 24
De NO₃-N-belasting van het denitrificerend vastbedstelsysteem gedurende de proefperiode



Figuur 25
De NO₃-N-verwijdering als functie van de NO₃-N-belasting van het denitrificerende vastbedstelsysteem; methanoldosering 2,75 kg/kg NO₃-N



Figuur 26

De NO₃-N-verwijdering als functie van de NO₃-N-belasting van het denitrificerende vastbedstelsysteem; methanoldosering 2,85 kg/kg NO₃-N

5.4.3 Methanol

Zoals uit de vorige paragraaf naar voren komt gebruikt het denitrificerend vastbedstelsysteem bij een rendement van ongeveer 95% onder de proefomstandigheden (gemiddeld 19 mg NO₃-N/l) 2,85 kg methanol/kg NO₃-N. De methanolconcentratie gemeten in enkele steekmonsters van de afvoer varieert van 0,1 tot 3 mg/l met uitschieters naar 8,0 mg/l. De overstort bovenin de denitrificerende vastbedreactor stript deze methanol voor een belangrijk deel uit het water.

In een steekmonster met een afvoerconcentratie van 6 mg methanol/l was deze concentratie na de overstort gezakt naar 1 mg/l.

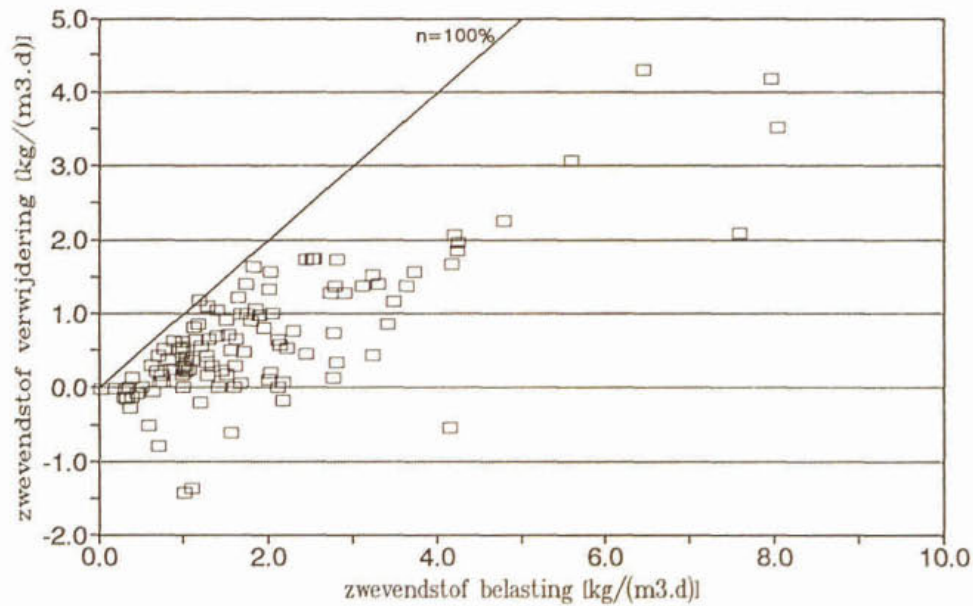
5.4.4 Zwevend stof

De zwevendstofverwijdering van het denitrificerend vastbedstelsysteem varieert sterk (figuur 27). Een aantal waarnemingen laat zelfs een produktie van zwevend stof zien. De oorzaak hiervoor moet waarschijnlijk worden gezocht in het ontstaan van kanaalvorming in het bed. Plaatselijk ontstaan daarbij hoge snelheden, waardoor biomassa en afgevangen zwevend stof kunnen worden meegevoerd. Gemiddeld over de proefperiode is 10 mg/l zwevend stof verwijderd.

5.4.5 Slibproduktie

De slibproduktie is geschat op basis van metingen tijdens drie spoelcycli. Hieruit blijkt dat gemiddeld 1,1 kg d.s. wordt uitgespoeld per kg NO₃-N die in de periode voor de betreffende spoelcyclus is verwijderd. Dit is twee keer zo hoog als de theoretische slibproduktie van denitrificerend slib (0,52 kg d.s./kg N_{verw.}) en komt overeen met de ervaringen van Degrémont.

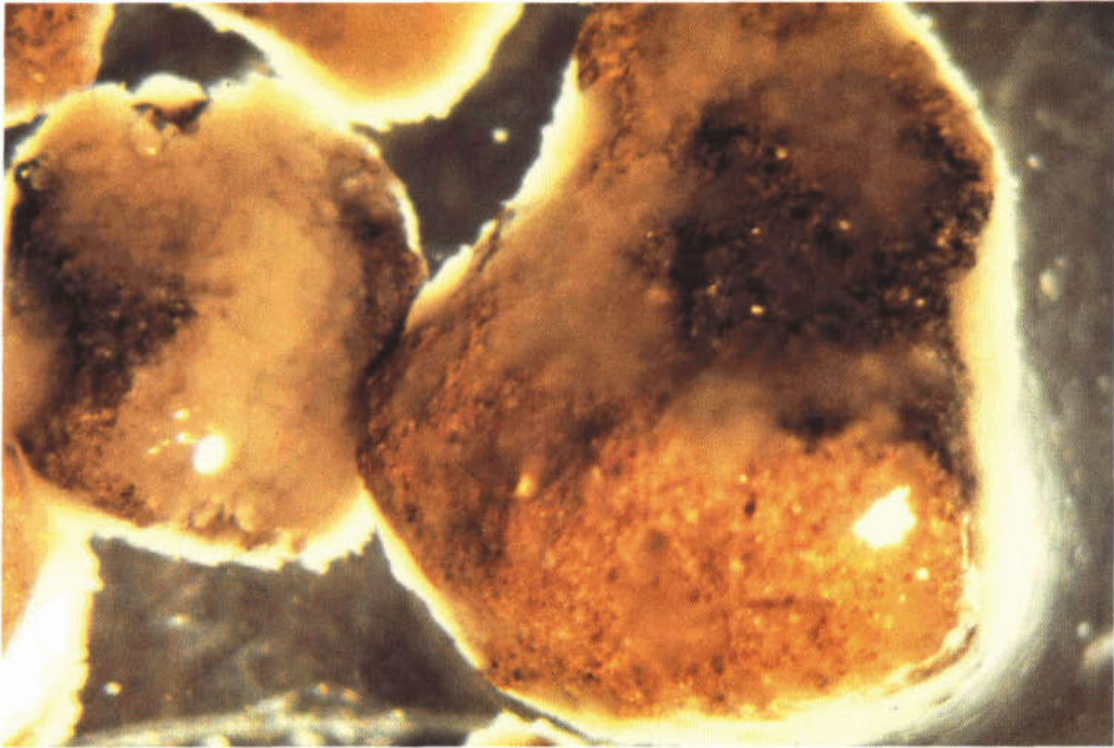
Uit de analyses van de dagmonsters blijkt, dat in de perioden voorafgaand aan de gemeten spoelcyclus, de afvoer aan zwevend stof gemiddeld gelijk was aan de aanvoer.



Figuur 27
De zwevendstofverwijdering als functie van de zwevendstofbelasting van het denitrificerend vastbedsysteem; gehele proefperiode

5.4.6 Biofilmonderzoek

De biomassa op het dragermateriaal in het denitrificerend vastbedsysteem bestaat uit een dunne biofilm met dikkere plukken (figuur 28). Deze dikkere plukken worden tijdens het spoelen van het bed grotendeels verwijderd. Nissen en gaten in het dragermateriaal groeien dicht. Bij de kleine korrels van ongeveer 1 mm leidt dit tot een concentrische begroeiing van de korrels met een dikte van 10 μ tot 100 μ . Enkele dagen nadat het bed met een pH 13 is schoon gemaakt is de biofilm over de gehele hoogte aanmerkelijk dunner dan in de situatie met een dichtgegroeid bed. Na schoonmaken van het bed is ook veel meer zwevend stof aanwezig tussen het dragermateriaal. Onder de filtervloer zijn grote vlokken zwevend stof waargenomen. Op één van de bemonsteringsdata zijn de aquatische wormen uit het nitrificerend vastbedsysteem onder de filtervloer van het denitrificerend vastbedsysteem in groten getale waargenomen.



Figuur 28
Stereomicroscopische opname van het dragermateriaal van het denitrificerend vastbedsysteem (deeltjes-
grootte 2 tot 7 mm)

6 TOEPASSING IN DE NEDERLANDSE PRAKTIJK

6.1 Inleiding

De resultaten uit het praktijkonderzoek zijn geanalyseerd en per systeem weergegeven als basis voor het ontwerp van praktijkinstallaties. De randvoorwaarden voor de bedrijfsvoering, zoals deze in het praktijkonderzoek naar voren zijn gekomen, zijn beschreven in hoofdstuk 4. In dit hoofdstuk worden de consequenties van deze randvoorwaarden voor het ontwerp aangegeven. Met name de afstemming van het technologisch en het hydraulisch ontwerp is hierbij van belang.

De kostenramingen (tabel 11 t/m 16) geven een goede indicatie, maar ook locatiespecifieke en commerciële overwegingen zijn van invloed op de stichtingskosten. De bedrijfsvoeringskosten worden sterk beïnvloed door de plaatselijke kosten voor energie, slibverwerking en methanol. Door het turn-key karakter zijn de deelprijzen niet gespecificeerd. Daarom is steeds een afschrijvingstermijn gehanteerd voor de gehele installatie.

6.2 Nitrificerend vastbedstelsel

6.2.1 *Ontwerpcriteria*

Essentieel aspect bij de resultaten is de BZV/N-verhouding van het aangevoerde water. Tijdens de proeven had een BZV/N-verhouding (gemiddeld 0,15) geen invloed op de resultaten. Uit de literatuur is bekend, dat bij toenemende BZV/N-verhouding een toenemend deel van het vastbedstelsel zal worden gebruikt voor BZV-verwijdering. De $\text{NH}_4\text{-N}$ -verwijdering zal daardoor afnemen.

Voor het opstellen van ontwerpcriteria voor het nitrificerend vastbedstelsel is uitgegaan van een goed functionerend systeem (proefperiode 1993). De randvoorwaarden voor een goed functioneren zijn (paragraaf 4.5):

- een gemiddelde hydraulische belasting van tenminste $4 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ met een absoluut minimum van $2 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$;
- een maximale hydraulische belasting van $12 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$;
- een spoelfrequentie van vier keer per week;
- één keer per 10 dagen een spoeling met een verhoogd waterdebiet.

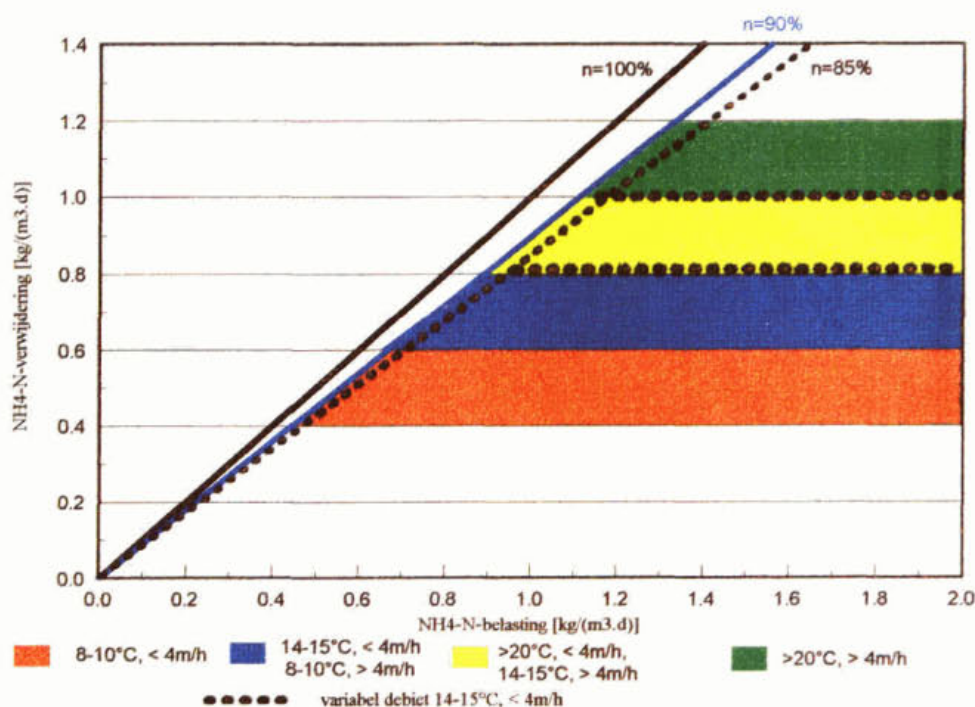
Op grond van de resultaten gedurende de proefperiode (paragraaf 5.2.3) is de maximale $\text{NH}_4\text{-N}$ -verwijdering van een goed functionerend nitrificerend vastbedstelsel in te schatten (tabel 10). Bij de inschatting voor een temperatuur van $8 - 10^\circ\text{C}$ en $> 20^\circ\text{C}$ is uitgegaan van een lineaire afname en toename van de nitrificatie-activiteit met de temperatuur. De relatie tussen de nitrificatie-activiteit en de temperatuur is afgeleid uit de resultaten over 1992 (tabel 3).

Tabel 10

De maximale $\text{NH}_4\text{-N}$ -verwijdering van het nitrificerend vastbedstelsysteem afhankelijk van temperatuur en hydraulische belasting (BZV/N gemiddeld 0,15), bij een constante hydraulische belasting

temperatuur [°C]	maximale $\text{NH}_4\text{-N}$ -verwijdering [kg/(m ³ .d)]	
	hydraulische belasting < 4 m ³ /(m ² .h)	hydraulische belasting ≥ 4 m ³ /(m ² .h)
8 - 10	0,4 - 0,6	0,6 - 0,8
14 - 15	0,6 - 0,8	0,8 - 1,0
> 20	0,8 - 1,0	1,0 - 1,2

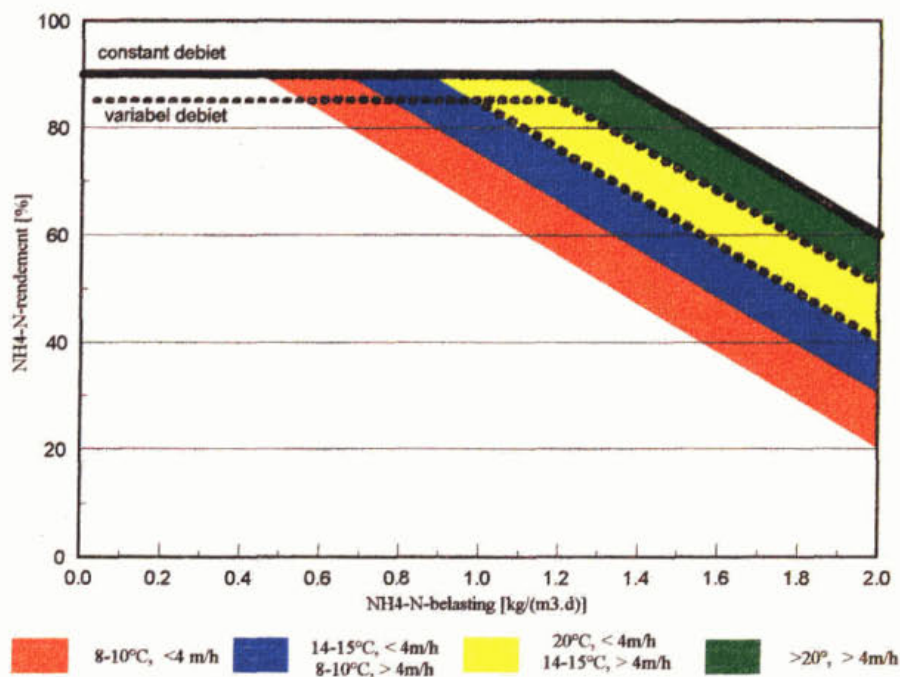
Uit de resultaten over 1993 blijkt dat het rendement van het nitrificerend vastbedstelsysteem 90% bedraagt totdat de maximale $\text{NH}_4\text{-N}$ -verwijdering is bereikt. Dit rendement en de ingeschatte bereiken voor de maximale $\text{NH}_4\text{-N}$ -verwijdering zijn weergegeven in figuur 29 als functie van de $\text{NH}_4\text{-N}$ -belasting. In figuur 30 zijn dezelfde resultaten weergegeven uitgedrukt in het rendement als functie van de $\text{NH}_4\text{-N}$ -belasting. Proeven met een variabel debiet resulteerden in een hogere maximale $\text{NH}_4\text{-N}$ -verwijdering bij een rendement van 85% (paragraaf 5.2.4). Dit resultaat is eveneens weergegeven in de figuren 29 en 30.



Figuur 29

De $\text{NH}_4\text{-N}$ -verwijdering als functie van de $\text{NH}_4\text{-N}$ belasting van het nitrificerend vastbedstelsysteem onder verschillende omstandigheden (BZV/N gemiddeld 0,15)

Met de figuren 29 en 30 kan bij een gewenst rendement de $\text{NH}_4\text{-N}$ -belastingen de $\text{NH}_4\text{-N}$ -verwijdering worden bepaald. Ook kunnen de figuren 29 en 30 worden gebruikt bij het dimensioneren van de benodigde reactor grootte.



Figuur 30

Het $\text{NH}_4\text{-N}$ -rendement als functie van de $\text{NH}_4\text{-N}$ -belasting van het nitrificerend vastbedstelsysteem onder verschillende omstandigheden (BZV/N gemiddeld 0,15)

6.2.2 Dimensioneringsvoorbeelden

In het eerste dimensioneringsvoorbeeld wordt uitgegaan van de behandeling van het effluent van een zuivering van 100.000 i.e. met de volgende karakteristieken:

DWA-debiet	150	l/(i.e. d)	(15.000 m ³ /d)
	10	l/(i.e. h)	(1.000 m ³ /h)
RWA-debiet	30	l/(i.e. h)	(3.000 m ³ /h)
$\text{NH}_4\text{-N}$ -vracht	600	kg/d	(40 mg/l bij DWA)
BZN/N	<0,2		

Aangenomen is dat de biologische zuiveringscapaciteit van de rwzi bij RWA zodanig is, dat kan worden uitgegaan van een verdunning van de $\text{NH}_4\text{-N}$ -concentratie.

Uitgangspunt voor de dimensionering is een rendement van 90% bij 8-10°C en een bedhoogte van 3 meter. Een rendement van 90% is bij de aangenomen relatief hoge $\text{NH}_4\text{-N}$ -concentratie noodzakelijk om te kunnen voldoen aan $N_{\text{total}} \leq 10$ mg/l. Hierbij is rekening gehouden met het feit dat in dit evaluatierapport is uitgegaan van de resultaten op basis van gefiltreerde monsters. De zwevendstofconcentratie geeft een aanzienlijke verhoging van de totale hoeveelheid stikstof. Een rendement van 90% is alleen mogelijk bij een constant aanvoerdebiet (figuur 30). Dit betekent dat debietwisselingen van de rwzi over de dag moeten worden opgevangen met een buffertank. Een buffertank zorgt tevens voor het uitmiddelen van de $\text{NH}_4\text{-N}$ -concentratie.

Uit figuur 30 is verder af te lezen dat de maximale belasting bij deze uitgangspunten ongeveer 0,75 kg $\text{NH}_4\text{-N}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ bedraagt voor een gemiddelde hydraulische belasting ≥ 4 m³/(m²·h).

De totale $\text{NH}_4\text{-N}$ -belasting van de voorbeeld-rwzi bedraagt 600 kg/d. Met een $\text{NH}_4\text{-N}$ -belasting van 0,75 kg/(m³.d) geeft dit een benodigd oppervlak van 267 m². De hydraulische belasting bij DWA bedraagt dan over 24 uur gemiddeld 2,3 m³/(m².h). Dit is lager dan de voor een $\text{NH}_4\text{-N}$ -belasting van 0,75 kg/(m³.d) vereiste 4 m³/(m².h). Dit betekent dat voor de voorbeeld-rwzi onder de genoemde condities een recirculatie noodzakelijk is.

De hydraulische belasting bij RWA bedraagt 11 m³/(m².h). Dit is lager dan de maximale hydraulische belasting en leidt zodoende niet tot aanpassing van het ontwerp.

Bij lage $\text{NH}_4\text{-N}$ -concentraties ontstaat een andere situatie. Dit wordt geïllustreerd door in het voorbeeld de $\text{NH}_4\text{-N}$ -vracht te veranderen in 270 kg/d (18 mg/l bij DWA). De overige uitgangspunten blijven onveranderd. Bij deze lage $\text{NH}_4\text{-N}$ -concentratie is een rendement van 85% voldoende om aan $N_{\text{totaal}} \leq 10$ mg/l te kunnen voldoen. Dit betekent dat met een variabel aanvoerdebiet kan worden gewerkt en derhalve geen buffertank nodig is. De maximale $\text{NH}_4\text{-N}$ -belasting bij variabel debiet en 8-10°C wordt op basis van de figuren 29 en 30 geschat op 0,75 kg/(m³.d). Hierbij is aangenomen dat dezelfde temperatuursafhankelijkheid optreedt als bij constant aanvoerdebiet. Op grond van de $\text{NH}_4\text{-N}$ -belasting en de ontwerp- $\text{NH}_4\text{-N}$ -belasting is een oppervlak nodig van 120 m². De hydraulische belasting bij DWA is overdag 8,3 m³/(m².h) en bij RWA 25 m³/(m².h). De hydraulische belasting bij RWA is hoger dan de maximale belasting van 12 m³/(m².h). Dit betekent dat in deze situatie de hydraulische belasting maatgevend is voor het ontwerp. Het benodigde oppervlak bij een maximale hydraulische belasting van 12 m³/(m².h) bedraagt 250 m². De hydraulische belasting bij DWA-aanvoer bedraagt daarbij overdag 4 m³/(m².h). Tijdens de nachtperiode kan de hydraulische belasting bij DWA-aanvoer echter tot onder de minimaal vereiste 2 m³/(m².h) zakken. Door een recirculatie te installeren kan de hydraulische belasting in alle reactoren op 2 m³/(m².h) worden gehandhaafd. Ook kunnen als alternatief een aantal reactoren worden afgesloten van de aanvoer, zodanig dat de hydraulische belasting van de overige reactoren tenminste 2 m³/(m².h) bedraagt. De reactoren zonder aanvoer moeten wel normaal worden belucht.

De $\text{NH}_4\text{-N}$ -concentratie waarbij de hydraulische belasting maatgevend is voor het ontwerp is afhankelijk van de aan te houden ontwerpbelasting. In het onderhavige voorbeeld is dit bij een concentratie < 23 mg $\text{NH}_4\text{-N/l}$.

6.2.3 *Kosten*

Een indicatie van de stichtingskosten en de exploitatiekosten van een nitrificerend vastbedstelsysteem is gegeven aan de hand van de twee voorbeelden uit paragraaf 6.2.2. en is weergegeven in de tabellen 11 en 12.

Voor de raming van de bouwkosten van een nitrificerend vastbedstelsysteem wordt door Degrémont, afhankelijk van de grootte van de installatie en het type fundering, uitgegaan van f 20.000,-- tot f 35.000,-- per m² reactor (exclusief BTW). Deze bouwkostenindicatie heeft betrekking op grote installaties waar tenminste 8 reactoren parallel worden bedreven en het totale reactoroppervlak tenminste 160 m² bedraagt. De maximale grootte van een vastbedreactor is ongeveer 100 m². De betreffende deelraming (onderdeel b uit de tabellen 11 en 12) heeft betrekking op het vastbedstelsysteem inclusief besturing en heeft, zoals eerder aangegeven, een turn-key karakter.

Tabel 11

Kosten van het nitrificerend vastbedstelsysteem voor een voorbeeld-rwzi met een hoge stikstofconcentratie

karakteristieken voorbeeld-rwzi: ●DWA-debiet 1000 m ³ /h en 15.000 m ³ /d ●RWA-debiet 3000 m ³ /h ●NH ₄ -N- vracht 600 kg/d ●NH ₄ -N- concentratie bij DWA 40 mg/l ●BZV/N < 0,2	kosten per eenheid <i>f</i>	aantal eenheden	kosten voorbeeld-rwzi <i>f</i>	opmerkingen
a. bouwrijp maken	10,-/m ²	3000 m ²	30.000,-	3 x reactoroppervlak + 2200 m ² voor buffertank fundering op staal
b. bouwkosten vastbedstelsysteem	30.000,-/m ²	267 m ²	8.010.000,-	
c. recirculatie - leiding - pompen	2.100,-/m 50.000,-/st	50 m 2	105.000,- 100.000,-	leidingdiameter 500 mm
d. bouwkosten buffertank			850.000,-	7500 m ³ buffering, 6 m hoge tank
e. aanleg wegen	800,-/m	100 m	80.000,-	5 meter breed
f. bijkomende kosten			907.000,-	10% over b, c, en d
g. onvoorzien			1.008.000,-	10% over a t/m f
h. advieskosten			1.109.000,-	10% over a t/m g
i. BTW			2.135.000,-	17,5% over a t/m h
Stichtingskosten (inclusief BTW, exclusief grondkosten) Kapitaalslasten			14.334.000,- 1.515.000,-/jaar	annuïteiten, afschrijving 20 jaar, rente 8,5%
k. onderhoudskosten			302.000,-/jaar	3% van de bouwkosten (b, c, d en g)
l. energiekosten	0,12/kWh	1.133.000 kWh/jaar	136.000,-/jaar	vastbed: 4.000 kWh/(m ² jaar) recirculatie: 65.000 kWh/jaar 1,0 kg d.s./kg N _{verw} rendement 90%
m. slibverwerkings- en -afvoerkosten	1000,-/ton d.s.	197.000 kg d.s./jaar	197.000,-/jaar	
n. personeelskosten	80.000,-/form-pl. jaar.	0,25 formatieplaats	20.000,-/jaar	
o. BTW			111.000,-/jaar	17,5% over k, l en m
Bedrijfsvoeringskosten (inclusief BTW)			766.000,-/jaar	
Exploitatiekosten (inclusief BTW)			2.281.000,-/jaar	kapitaalslasten + bedrijfsvoeringskosten
Exploitatiekosten (inclusief BTW)			11,50/kg N _{verw}	197.000 kg N _{verw} /jaar

Tabel 12

Kosten van het nitrificerend vastbedstelsysteem voor een voorbeeld-rwzi met een lage stikstofconcentratie

karakteristieken voorbeeld-rwzi: * DWA-debiet 1000 m ³ /h en 15.000 m ³ /d * RWA-debiet 3000 m ³ /h * NH ₄ -N- vracht 270 kg/d * NH ₄ -N- concentratie bij DWA 18 mg/l * BZV/N < 0,2	kosten per eenheid <i>f</i>	aantal eenheden	kosten voorbeeld-rwzi <i>f</i>	opmerkingen
a. bouwrijp maken	10,-/m ²	800 m ²	8.000,-	3 x reactoroppervlak + 50 m ² voor recirculietank fundering op staal onder vrij verval leidingdiameter 300 mm met drijfslagafvoer en slibafvoer, 2 m hoog 5 meter breed
b. bouwkosten vastbedstelsysteem	30.000,-/m ²	250 m ²	7.500.000,-	
c. recirculatie				
- leiding	1.250,-/m	30 m	38.000,-	
- tank	1.000,-/m ³	30 m ³	30.000,-	
e. aanleg wegen	800,-/m	25 m	20.000,-	
f. bijkomende kosten			757.000,-	
g. onvoorzien			835.000,-	
h. advieskosten			919.000,-	
i. BTW			1.769.000,-	
Stichtingskosten (inclusief BTW, exclusief grondkosten) Kapitaalslasten			11.876.000,- 1.255.000,-/jaar	annuïteiten, afschrijving 20 jaar, rente 8,5%
k. onderhoudskosten			252.000,-/jaar	3% van de bouwkosten (b, c en g)
l. energiekosten	0,12/kWh	1.000.000 kWh/jaar	120.000,-/jaar	4.000 kWh/(m ² jaar)
m. slibverwerkings- en -afvoerkosten	1000,-/ton d.s.	84.000 kg d.s./jaar	84.000,-/jaar	1,0 kg d.s./kg N _{verw} rendement 85%
n. personeelskosten	80.000,-/formpl. jaar.	0,25 formatieplaats	20.000,-/jaar	
o. BTW			80.000,-/jaar	17,5% over k, l en m
Bedrijfsvoeringskosten (inclusief BTW)			556.000,-/jaar	
Exploitatiekosten (inclusief BTW)			1.811.000,-/jaar	kapitaalslasten + be- drijfsvoeringskosten
Exploitatiekosten (inclusief BTW)			21,50/kg N _{verw}	84.000 kg N _{verw} /jaar

6.3 Denitrificerend fluidbedstelsysteem

6.3.1 Ontwerpcriteria

Uitgangspunt bij het ontwerpen van een denitrificerend fluidbedstelsysteem is een goed functioneren van dit systeem. De randvoorwaarden hiervoor zijn (paragraaf 4.6):

- een vastbedhoogte van 2,1 meter;
- een fluidbedhoogte van 3 meter;
- de totale hoeveelheid vaste stof (zand en biomassa) in het fluidbed bovenin minimaal 300 kg/m³ en onderin 700 tot 1000 kg/m³;
- de plaatselijke vastbed/fluidbed-verhouding bepaald aan een monster, dat gedurende 5 minuten is bezonken, is bovenin de reactor minimaal 0,45-0,50 en onderin maximaal 0,70-0,80;

- de verdeling van de hoeveelheid vaste stof (zand en biomassa) over de hoogte van de reactor blijft ongeveer constant in de tijd;
- de concentratie biomassa in het fluidbed is maximaal 25 kg/m³;
- de hydraulische belasting ligt tussen 20 en 24 m³/(m².h).

De resultaten tijdens de proefperiode laten zien dat de nitraatverwijdering van het denitrificerende fluidbedsysteem ongeveer 95% is bij een methanoldosering van 2,75 kg/kg NO₃-N voor NO₃-N belastingen kleiner dan 6 kg/(m³.d) (figuur 20). Als ontwerpbelasting moet vooralsnog maximaal gemiddeld 1,8 kg NO₃-N/(m³.d) worden aangehouden. Piekbelastingen tot 6 kg NO₃-N/(m³.d) zijn hierbij geen bezwaar gebleken. Hierdoor zijn variaties tussen de nitraatbelasting overdag en 's nachts geen probleem.

6.3.2 Dimensioneringsvoorbeelden

Uitgegaan wordt van het effluent van de voorbeeld-rwzi uit paragraaf 6.2.1, waarbij het water is genitrificeerd in een vastbedsysteem, zoals uitgewerkt in die paragraaf. Dit resulteert in een NO₃-N-vracht van 540 kg/d (36 mg/l bij DWA). Het DWA-debiet blijft 15.000 m³/d en 1000 m³/h, en het RWA-debiet 3000 m³/h. Bij deze totale NO₃-N-vracht en de aan te houden ontwerpbelasting van 1,8 kg NO₃-N/(m³.d) bedraagt het benodigde reactoroppervlak 100 m².

De hydraulische belasting van het denitrificerend fluidbedsysteem is constant en ligt tussen 20 en 24 m³/(m².h). Uitgaande van het RWA debiet (3000 m³/h) wordt het benodigd reactoroppervlak 150 tot 125 m². De hydraulische randvoorwaarde heeft derhalve een aanpassing van het ontwerp tot gevolg. Uitgaande van het RWA-debiet en een hydraulische belasting van 20 m³/(m².h) is dit het geval bij een NO₃-N-vracht < 810 kg/d, uitgaande van 24 m³/(m².h) bij een NO₃-N-vracht < 675 kg/d. Voor de debietverhouding bij de voorbeeld-rwzi betekent dit NO₃-N-concentraties bij DWA respectievelijk < 54 mg/l en < 45 mg/l.

Voor de tweede voorbeeld-rwzi uit paragraaf 6.2.1. zijn de debieten gelijk gehouden, maar is de NO₃-N-vracht verlaagd naar 230 kg/d.

Het benodigde reactoroppervlak bij een ontwerpbelasting van 1,8 kg NO₃-N/(m³.d) bedraagt nu 43 m². De hydraulische belasting is niet gewijzigd, zodat nog steeds een reactoroppervlak van 150 tot 125 m² maatgevend is.

6.3.3 Kosten

Voor een indicatie van de stichtingskosten en de exploitatiekosten van het denitrificerend fluidbedsysteem is uitgegaan van de twee dimensioneringsvoorbeelden uit paragraaf 6.3.2. De kostenindicatie is weergegeven in de tabellen 13 en 14.

De bouwkosten van een denitrificerend fluidbedsysteem worden afhankelijk van de grootte van de reactoren en het type fundering door Dorr-Oliver geraamd op f 45.000,-- tot f 60.000,-- per m² reactor (exclusief BTW). Deze raming heeft betrekking op reactoren van 60 tot 120 m² (maximale grootte) en een fluidbedhoogte van 3 tot 4,5 meter. De betreffende deelraming (onderdeel b uit de tabellen 13 en 14) heeft betrekking op het fluidbedsysteem inclusief besturing en heeft een turn-key karakter.

Tabel 13

Kosten van het denitrificerend fluidbedsysteem voor een voorbeeld-rwzi met een hoge stikstofconcentratie

karakteristieken voorbeeld-rwzi: ● DWA-debiet 1000 m ³ /h en 15.000 m ³ /d * RWA-debiet 3000 m ³ /h ● NO _x -N- vracht 540 kg/d ● NO _x -N- concentratie bij DWA 36 mg/l	kosten per eenheid <i>f</i>	aantal eenheden	kosten voorbeeld-rwzi <i>f</i>	opmerkingen
a. bouwrijp maken	10,-/m ²	250 m ²	3000,-	2 x reactoroppervlak
b. bouwkosten fluidbedsysteem	50.000,-/m ²	125 m ²	6.250.000,-	fundering op staal
c. bouwkosten methanolopslaggebouw	500,-/m ³	80 m ³	40.000,-	
d. aanleg wegen	800,-/m	20 m	16.000,-	5 meter breed
e. bijkomende kosten			629.000,-	10% over b en c
f. onvoorzien			694.000,-	10% over a t/m e
g. advieskosten			763.000,-	10% over a t/m f
h. BTW			1.469.000,-	17,5% over a t/m g
Stichtingskosten (inclusief BTW, exclusief grondkosten)			9.864.000,-	
Kapitaalslasten			1.042.000,-/jaar	annuïteiten, afschrijving 20 jaar, rente 8,5%
i. onderhoudskosten			210.000,-/jaar	3% van de bouwkosten (b, c en f)
k. methanolkosten	0,30/kg	515.000 kg/jaar	155.000,-/jaar	verbruik 2,75 kg/kg N _{verw} rendement 95%
l. energiekosten	0,12/kWh	3.000.000 kWh/jaar	360.000,-/jaar	24.000 kWh/m ² jaar bij continue zandbiomassascheiding
m. slibverwerkings- en -afvoerkosten	1000,-/ton ds	75.000 kg ds/jaar	75.000,-/jaar	0,4 kg ds/kg N _{verw} rendement 95%
n. personeelskosten	80.000,-/formpl. jaar.	0,25 formatieplaats	20.000,-/jaar	
o. BTW			140.000,-/jaar	17,5% over i t/m m
Bedrijfsvoeringskosten (inclusief BTW)			960.000,-/jaar	
Exploitatiekosten (inclusief BTW)			2.002.000,-/jaar	kapitaalslasten + bedrijfsvoeringskosten
Exploitatiekosten (inclusief BTW)			10,50/kg N _{verw}	187.000 kg N _{verw} /jaar

Tabel 14

Kosten van het denitrificerend fluidbedstelsysteem voor een voorbeeld-rwzi met een lage stikstofconcentratie

karakteristieken voorbeeld-rwzi: * DWA-debiet 1000 m ³ /h en 15.000 m ³ /d * RWA-debiet 3000 m ³ /h * NO ₃ -N- vracht 230 kg/d * NO ₃ -N- concentratie bij DWA 15,3 mg/l	kosten per eenheid <i>f</i>	aantal eenheden	kosten voorbeeld-rwzi <i>f</i>	opmerkingen
a. bouwrijp maken	10,-/m ²	250 m ²	3000,-	2 x reactoroppervlak
b. bouwkosten fluidbedstelsysteem	50.000,-/m ²	125 m ²	6.250.000,-	fundering op staal
c. bouwkosten methanolopslaggebouw	500,-/m ³	80 m ³	40.000,-	
d. aanleg wegen	800,-/m	20 m	16.000,-	5 meter breed
e. bijkomende kosten			629.000,-	10% over b en c
f. onvoorzien			694.000,-	10% over a t/m e
g. advieskosten			763.000,-	10% over a t/m f
h. BTW			1.469.000,-	17,5% over a t/m g
Stichtingskosten (inclusief BTW, exclusief grondkosten) Kapitaalslasten			9.864.000,- 1.042.000,-/jaar	annuïteiten, afschrijving 20 jaar, rente 8,5%
i. onderhoudskosten			210.000,-/jaar	3% van de bouwkosten (b, c en f)
k. methanolkosten	0,30/kg	220.000 kg/jaar	66.000,-/jaar	verbruik 2,75 kg/kg N _{verw} rendement 95%
l. energiekosten	0,12/kWh	3.000.000 kWh/jaar	360.000,-/jaar	24.000 kWh/m ² jaar bij continue zandbiomassa- scheiding
m. slibverwerkings- en -afvoerkosten	1000,-/ton ds	32.000 kg ds/jaar	32.000,-/jaar	0,4 kg ds/kg N _{verw} rendement 95%
n. personeelskosten	80.000,-/formpl. jaar.	0,25 formatieplaats jaar.	20.000,-/jaar	
o. BTW			117.000,-/jaar	17,5% over i t/m m
Bedrijfsvoeringskosten (inclusief BTW)			805.000,-/jaar	
Exploitatiekosten (inclusief BTW)			1.847.000,-/jaar	kapitaalslasten + be- drijfsvoeringskosten
Exploitatiekosten (inclusief BTW)			23,-/kg N _{verw}	80.000 kg N _{verw} /jaar

6.4 Denitrificerend vastbedstelsysteem

6.4.1 Ontwerpcriteria

Uitgangspunt bij het ontwerpen van een denitrificerend vastbedstelsysteem is een goed functioneren van dit systeem. De randvoorwaarden hiervoor zijn (paragraaf 4.7):

- een vastbedhoogte van minimaal 2,2 meter;
- een hydraulische belasting van gemiddeld minimaal 7 m³/(m².h) met een absoluut minimum van 5 m³/(m².h);
- een maximale hydraulische belasting van 14 m³/(m².h);
- een spoelfrequentie van drie keer per twee dagen;
- methanoldosering in een deelstroom van 80% in het bed.

Uit de praktijkproef blijkt dat de nitraatverwijdering van het denitrificerende fluidbedstelsysteem ongeveer 95% is bij een methanoldosering van 2,85 kg/kg NO₃-N voor NO₃-N-belastingen kleiner dan 4,5 kg NO₃-N/(m³.d) (figuur 26). Als ontwerpbelasting moet vooralsnog maximaal

gemiddeld 1,8 kg NO₃-N/(m³.d) worden aangehouden. Piekbelastingen tot 4,5 kg NO₃-N/(m³.d) zijn hierbij geen bezwaar gebleken. Hierdoor zijn variaties in de nitraatbelasting overdag en 's nachts technologisch geen probleem.

6.4.2 Dimensioneringsvoorbeelden

Evenals voor het denitrificerend fluidbedsysteem wordt de reactorgrootte gedimensioneerd met het effluent van de voorbeeld-rwzi uit paragraaf 6.2.1 als uitgangspunt, waarbij het denitrificerend vastbedsysteem het genitrificeerde water aangevoerd krijgt.

Bij de NO₃-N-vracht van 540 kg/d en de aan te houden ontwerpbelasting van 1,8 kg NO₃-N/(m³.d) is een reactorinhoud nodig van 300 m³. De hoogte van het bed ligt tussen 2,2 en 3 meter, afhankelijk van de hydraulische belasting.

Het RWA-debiet is drie keer hoger verondersteld dan het DWA-debiet. Uit de randvoorwaarden wordt duidelijk dat de maximale hydraulische belasting twee keer hoger is dan de minimale gemiddelde hydraulische belasting. Dit betekent dat recirculatie noodzakelijk is om bij DWA de hydraulische belasting op het minimaal gemiddelde niveau te houden van 7 m³/(m².h). Bij deze hydraulische belasting moet een bedhoogte worden aangehouden van 2,2 meter, waardoor het benodigde oppervlak 136 m² bedraagt. Recirculatie is ook noodzakelijk om tijdens de nachtperiode de hydraulische belasting op tenminste 5 m³/(m².h) te handhaven. Met een maximale hydraulische belasting van 14 m³/(m².h) en een RWA-debiet van 3.000 m³/h wordt het benodigde reactoroppervlak 214 m². Deze hydraulische randvoorwaarde is dus bepalend voor het ontwerp.

De hydraulische randvoorwaarde is, uitgaande van een RWA-debiet van 3000 m³/h, bepalend voor het ontwerp bij een NO₃-N-vracht < 848 kg/d. Bij de debietverhouding van de voorbeeld-rwzi betekent dit een NO₃-N-concentratie bij DWA < 90 mg/l.

Aansluitend op de tweede voorbeeld-rwzi uit paragraaf 6.2.1 blijven de debieten gelijk, maar is de NO₃-N-vracht verlaagd naar 230 kg/d (15 mg NO₃-N/l bij DWA). Op basis van deze nitraatvracht en de ontwerpbelasting is een reactor nodig van 58 m³ bij een bedhoogte van 2,2 meter. Vanwege het RWA-debiet van 3000 m³/h blijft een reactoroppervlak nodig van 214 m². De hydraulische randvoorwaarde blijft bepalend voor het ontwerp.

6.4.3 Kosten

De voorbeelden uit paragraaf 6.4.2. hebben de basis gevormd voor een indicatie van de stichtingskosten en exploitatiekosten van een denitrificerend vastbedsysteem. De kostenindicaties van de twee voorbeelden zijn weergegeven in de tabellen 15 en 16.

Voor de raming van de bouwkosten van het denitrificerend vastbedsysteem wordt door Degrémont van dezelfde bedragen uitgegaan als voor het nitrificerend vastbedsysteem. Afhankelijk van de grootte van de installatie en het type fundering wordt door Degrémont dus uitgegaan van f 20.000,-- tot f 35.000,-- per m² reactor (exclusief BTW). Ook deze bouwkostenindicatie heeft betrekking op grote installaties waar tenminste 8 reactoren parallel worden bedreven en het totale reactoroppervlak tenminste 160 m² bedraagt. Deze deelraming (onderdeel b uit de tabellen 15 en 16) heeft een turn-key karakter.

Tabel 15

Kosten van het denitrificerend vastbedstelsysteem voor een voorbeeld-rwzi met een hoge stikstofconcentratie

karakteristieken voorbeeld-rwzi: * DWA-debiet 1000 m ³ /h en 15.000 m ³ /d * RWA-debiet 3000 m ³ /h * NO ₃ -N- vracht 540 kg/d * NO ₃ -N- concentratie bij DWA 36 mg/l	kosten per eenheid <i>f</i>	aantal eenheden	kosten voorbeeld-rwzi <i>f</i>	opmerkingen
a. bouwrijp maken	10,-/m ²	750 m ²	8000,-	3 x reactoroppervlak + 100 m ² voor recirculatiestank fundering op staal
b. bouwkosten vastbedstelsysteem	30.000,-/m ²	214 m ²	6.420.000,-	
c. bouwkosten methanolopslaggebouw	500,-/m ³	80 m ³	40.000,-	
d. aanleg recirculatie				onder vrij verval leidingdiameter 500 mm met drijfllaagafvoer en slibafvoer, 2 m hoog 5 meter breed
- leiding	2100,-/m	50 m	105.000,-	
- tank	875,-/m	125 m ³	110.000,-	
e. aanleg wegen	800,-/m	25 m	20.000,-	
f. bijkomende kosten			668.000,-	10% over b, c en d
g. onvoorzien			737.000,-	10% over a t/m f
h. advieskosten			811.000,-	10% over a t/m g
i. BTW			1.561.000,-	17,5% over a t/m h
Stichtingskosten (inclusief BTW, exclusief grondkosten)			10.480.000,-	
Kapitaalslasten			1.107.000,-/jaar	annuïteiten, afschrijving 20 jaar, rente 8,5%
k. onderhoudskosten			222.000,-/jaar	3% van de bouwkosten (b, c, d en g)
l. methanolkosten	0,30/kg	533.000 kg/jaar	160.000,-/jaar	verbruik 2,85 kg/kg N _{verw} rendement 95%
m. energiekosten	0,12/kWh	321.000 kWh/jaar	39.000,-/jaar	1.500 kWh/(m ² .jaar)
n. slibverwerkings- en -afvoerkosten	1000,-/ton ds	206.000 kg ds/jaar	206.000,-/jaar	1,1 kg ds/kg N _{verw} rendement 95%
o. personeelskosten	80.000,-/formpl. jaar.	0,25 formatieplaats	20.000,-/jaar	
p. BTW			110.000,-/jaar	17,5% over k t/m n
Bedrijfsvoeringskosten (inclusief BTW)			757.000,-/jaar	
Exploitatiekosten (inclusief BTW)			1.864.000,-/jaar	kapitaalslasten + bedrijfsvoeringskosten
Exploitatiekosten (inclusief BTW)			10,-/kg N _{verw}	187.000 kg N _{verw} /jaar

Tabel 16

Kosten van het denitrificerend vastbedstelsysteem voor een voorbeeld-rwzi met een lage stikstofconcentratie

karakteristieken voorbeeld-rwzi: * DWA-debiet 1000 m ³ /h en 15.000 m ³ /d * RWA-debiet 3000 m ³ /h * NO _x -N- vracht 230 kg/d * NO _x -N- concentratie bij DWA 15,3 mg/l	kosten per eenheid <i>f</i>	aantal eenheden	kosten voorbeeld-rwzi <i>f</i>	opmerkingen
a. bouwrijp maken	10,-/m ²	750 m ²	8000,-	3 x reactoroppervlak + 100-m ² voor recirculatie tanks fundering op staal
b. bouwkosten vastbedstelsysteem	30.000,-/m ²	214 m ²	6.420.000,-	
c. bouwkosten methanolopslaggebouw	500,-/m ³	80 m ³	40.000,-	
d. aanleg recirculatie				onder vrij verval leidingdiameter 500 mm met drijfllaagafvoer en slibafvoer, 2 m hoog 5 meter breed
- leiding	2100,-/m	50 m	105.000,-	
- tank	875,-/m ³	125 m ³	110.000,-	
e. aanleg wegen	800,-/m	25 m	20.000,-	
f. bijkomende kosten			668.000,-	10% over b, c en d
g. onvoorzien			737.000,-	10% over a t/m f
h. advieskosten			811.000,-	10% over a t/m g
i. BTW			1.561.000,-	17,5% over a t/m h
Stichtingskosten (inclusief BTW, exclusief grondkosten)			10.480.000,-	
Kapitaalslasten			1.107.000,-/jaar	annuïteiten, afschrijving 20 jaar, rente 8,5%
k. onderhoudskosten			222.000,-/jaar	3% van de bouwkosten (b, c, d en g)
l. methanolkosten	0,30/kg	227.000 kg/jaar	68.000,-/jaar	verbruik 2,85 kg/kg N _{verw} rendement 95%
m. energiekosten	0,12/kWh	321.000 kWh/jaar	39.000,-/jaar	1.500 kWh/(m ² .jaar)
n. slibverwerkings- en -afvoerkosten	1000,-/ton ds	88.000 kg ds/jaar	88.000,-/jaar	1,1 kg ds/kg N _{verw} rendement 95%
o. personeelskosten	80.000,-/formpl. jaar.	0,25 formatieplaats	20.000,-/jaar	
p. BTW			73.000,-/jaar	17,5% over k t/m n
Bedrijfsvoeringskosten (inclusief BTW)			510.000,-/jaar	
Exploitatiekosten (inclusief BTW)			1.617.000,-/jaar	kapitaalslasten + bedrijfsvoeringskosten
Exploitatiekosten (inclusief BTW)			20,-/kg N _{verw}	80.000 kg N _{verw} /jaar

7 EVALUATIE EN CONCLUSIES

7.1 Nitrificerend vastbedstelsysteem

7.1.1 *Bedrijfsvoering*

Uit de praktijkproef is gebleken dat de randvoorwaarden voor een goede bedrijfsvoering zijn:

- een minimale gemiddelde hydraulische belasting van $4 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$;
- een minimale hydraulische belasting van $2 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$;
- een maximale hydraulische belasting van $12 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$;
- een spoelfrequentie van vier keer per week;
- één keer per 10 dagen spoelen met een debiet van $30 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ in plaats van $20 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$.

Bij vergelijking met de door Degrémont opgegeven dimensioneringsgrondslagen (paragraaf 3.2.1) valt op dat:

- de minimale hydraulische belasting is verhoogd van 1,5 naar $2 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$;
- de toegelaten maximale hydraulische belasting is verhoogd van 10 naar $12 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$;
- een randvoorwaarde voor een minimale gemiddelde hydraulische belasting is toegevoegd;
- het bed vier keer per week moet worden gespoeld in plaats van twee keer per week;
- één keer per 10 dagen een spoeling bij hoger debiet moet worden uitgevoerd.

Deze wijzigingen van de randvoorwaarden bleken nodig om dichtslibben van het bed met zwevend stof, biomassa en wormen te voorkomen.

Controle op dichtslibben moet wekelijks gebeuren door de benodigde tijd voor verlaging van het waterniveau aan het begin van de spoelcyclus te bepalen. Wanneer deze tijd toeneemt moet een extra spoeling bij hoog debiet worden uitgevoerd.

7.1.2 *Resultaten*

Het bicarbonaatgehalte van het effluent van de rwzi Houtrust was zodanig hoog, dat de pH in het nitrificerend vastbedstelsysteem in geringe mate steeg. Omdat het nitrificatieproces zuur produceert kan bij ander afvalwater een loogdosering nodig zijn om de pH op minimaal 6,5 te handhaven.

De BZV/N-verhouding van het aangevoerde water lag gemiddeld op ongeveer 0,2. Deze relatief lage verhouding bleek niet van invloed op het nitrificatieproces.

De prestaties van het nitrificerend vastbedstelsysteem blijken afhankelijk te zijn van de hydraulische belasting en van de temperatuur. De resultaten zijn weergegeven in tabel 17.

Tabel 17

Maximale $\text{NH}_4\text{-N}$ -verwijdering van het nitrificerend vastbedstelsysteem bij constant debiet

temperatuur [°C]	periode	hydraulische belasting [$\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]	maximale $\text{NH}_4\text{-N}$ -verwijdering [$\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$]
14 - 15	1992	<4	0,5 - 0,7
> 20	1992	<4	0,7 - 0,9
14 - 15	1993	<4	0,6 - 0,8
14 - 15	1993	>4	0,6 - 1,0

De $\text{NH}_4\text{-N}$ -verwijdering in 1992 was lager dan in 1993, doordat het bed onderin was dichtgeslibd als gevolg van de lage hydraulische belasting. De resultaten van 1993 worden representatief geacht voor een goed functionerend systeem.

Bij vergelijking van de resultaten met de dimensioneringsgrondslagen die bij het begin van de praktijkproef zijn gegeven (paragraaf 3.2.1) valt op dat:

- de dimensioneringsgrondslagen niet zijn gedifferentieerd naar temperatuur en hydraulische belasting;
- het tijdens de praktijkproef gerealiseerde rendement (90% bij constante hydraulische belasting en 85% bij variabele hydraulische belasting) veel hoger ligt dan het door Degrémont gegeven rendement (75%);
- de opgegeven $\text{NH}_4\text{-N}$ -verwijdering overeenkomt met de laagste waarden die zijn gevonden tijdens de praktijkproef.

Bij de gebruikte Biolitevulling van het nitrificerend vastbedsysteem met een diameter van 3 tot 6 mm is gemiddeld 20 mg/l (44%) van het aangevoerde zwevend stof verwijderd. Met het spoelwater wordt gemiddeld 1,0 kg d.s. afgevoerd per kg $\text{NH}_4\text{-N}_{\text{verw}}$.

7.1.3 Toepassing in de Nederlandse praktijk

De resultaten van de praktijkproef zijn uitgewerkt tot twee grafieken (figuur 29 en 30). Met behulp van deze grafieken kan de reactor voor een specifiek geval worden gedimensioneerd.

Van de in hoofdstuk 6 uitgewerkte voorbeelden blijkt bij een DWA debiet van 15.000 m³/d, een $\text{NH}_4\text{-N}$ -concentratie van 40 mg/l (bij DWA) en een RWA-debiet van 3000 m³/h een vastbed nodig te zijn met een oppervlak van 267 m² en een hoogte van 3 meter. Tevens is een buffertank en een recirculatie nodig om aan de randvoorwaarden voor de hydraulische belasting te kunnen voldoen bij de gewenste 90% rendement. De exploitatiekosten voor het nitrificerend vastbedsysteem van deze voorbeeld-rwzi bedragen f 11,50 per kg $\text{NH}_4\text{-N}_{\text{verw}}$ (f 7,50 kapitaalslasten en f 4,-- bedrijfsvoeringskosten).

Dit is aanmerkelijk hoger dan de f 5,--/kg $\text{NH}_4\text{-N}_{\text{verw}}$ die uit de literatuurstudie naar voren is gekomen; met name wordt dit veroorzaakt door de buffertank en de recirculatie, die nodig zijn om te voldoen aan de hydraulische randvoorwaarden.

Het ruimtebeslag van alleen de reactor van de voorbeeld-rwzi bedraagt 0,49 m² per kg $\text{N}_{\text{verw}}/\text{d}$. Dit komt overeen met de resultaten van de literatuurstudie (0,45 m² per kg $\text{N}_{\text{verw}}/\text{d}$). Het totale ruimtebeslag van het nitrificerend vastbedsysteem, dus inclusief buffertank, spoelwatertank, leidingstraten en dergelijke, bedraagt echter 5,6 m² per kg $\text{N}_{\text{verw}}/\text{d}$. Dit is veel meer dan op grond van de literatuurstudie werd verwacht (0,55 m² per kg $\text{NH}_4\text{-N}_{\text{verw}}/\text{d}$). Het grote verschil wordt vooral veroorzaakt door de noodzakelijke buffertank, maar ook zonder deze buffertank is het totale ruimtebeslag bijna drie keer groter dan uit de literatuurstudie naar voren is gekomen.

In het andere voorbeeld dat in hoofdstuk 6 is uitgewerkt, wordt uitgegaan van een DWA-debiet van 15.000 m³/d, een $\text{NH}_4\text{-N}$ -concentratie van 18 mg/l (bij DWA) en een RWA-debiet van 3000 m³/h. De grootte van het nitrificerend vastbedsysteem wordt nu bepaald door de hydraulische randvoorwaarden. Bij de $\text{NH}_4\text{-N}$ -concentratie van 18 mg/l kan een rendement van 85% en daarmee een variabel debiet worden toegestaan, zodat een buffertank niet noodzakelijk is. Een recirculatie blijft noodzakelijk om te kunnen voldoen aan de hydraulische randvoorwaarden. De hydraulische randvoorwaarden brengen met zich mee dat het vastbedsysteem nu niet tot de ontwerp- NH_4 -belasting kan worden belast, zodat de exploitatiekosten per kg $\text{NH}_4\text{-N}_{\text{verw}}$ stijgen naar f 21,50.

Het niet optimale gebruik van het systeem heeft dan ook tot gevolg dat het ruimtebeslag van de reactor ongunstiger wordt. Voor deze tweede voorbeeld-rwzi is het ruimtebeslag van alleen de reactor $1,0 \text{ m}^2$ per $\text{kg N}_{\text{verw}}/\text{d}$. Het totale ruimtebeslag loopt terug naar $3,5 \text{ m}^2$ per $\text{kg N}_{\text{verw}}/\text{d}$, doordat de buffertank niet meer nodig is.

7.2 Denitrificerend fluidbedsysteem

7.2.1 *Bedrijfsvoering*

Het grootste deel van de proeftijd is besteed aan het zoeken naar de criteria voor een goede bedrijfsvoering van het denitrificerend fluidbedsysteem.

Gebleken is dat het systeem goed functioneert, als wordt voldaan aan de volgende criteria:

- een vastbedhoogte van 2,1 meter;
- een fluidbedhoogte van 3 meter;
- een totale hoeveelheid vaste stof/ m^3 in het fluidbed bovenin minimaal $300 \text{ kg}/\text{m}^3$ en onderin 700 tot $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$;
- een plaatselijke vastbed/fluidbed-verhouding, bepaald aan een monster na 5 minuten bezinking, bovenin het fluidbed minimaal 0,45-0,50 en onderin maximaal 0,70-0,80;
- de verdeling vaste stof over de hoogte van het fluidbed blijft ongeveer constant in de tijd;
- een concentratie biomassa van maximaal $25 \text{ kg}/\text{m}^3$;
- een continue zand/biomassascheiding.

Een opvallend verschil met de door Dorr-Oliver opgegeven dimensioneringsgrondslagen (paragraaf 3.3.1) is de verlaging van het fluidbed. Bij een fluidbed hoger dan 3 meter blijkt een deel niet functioneel in het denitrificatieproces en wordt daarmee overbodig.

Bij de ontwerpbelasting ($1,8 \text{ kg NO}_3\text{-N}/\text{m}^3\cdot\text{d}$) kan goed worden voldaan aan de genoemde criteria. Bij een langdurig hogere nitraatbelasting is de verdeling van de vaste stof over de hoogte van het bed moeilijk constant te houden en kan de totale hoeveelheid vaste stof binnen enkele weken onder de genoemde grenzen zakken. Uitspoeling kan hiervan het gevolg zijn. Verdergaand onderzoek is nodig om na te gaan tot welke nitraatbelasting aan de criteria voor de bedrijfsvoering kan worden voldaan.

De plaatselijke vastbed/fluidbed-verhouding moet wekelijks worden bepaald ter controle van de bedrijfsvoering.

7.2.2 *Resultaten*

De ontwerp $\text{NO}_3\text{-N}$ -belasting van $1,8 \text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ kan als gemiddelde belasting worden aangehouden. Het $\text{NO}_3\text{-N}$ -verwijderingsrendement is daarbij 95%. Piekbelastingen tot tenminste $6 \text{ kg NO}_3\text{-N}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ blijken door het systeem zonder rendementsverlies te worden opgevangen.

Het methanolverbruik van het denitrificerend fluidbedsysteem is $2,75 \text{ kg}$ per $\text{kg NO}_3\text{-N}_{\text{verw}}$.

De zwevendstofconcentratie in de afvoer van het systeem is gemiddeld ongeveer $10 \text{ mg}/\text{l}$ hoger dan in de aanvoer. De slibafvoer bij de zand/biomassascheiding bedraagt gemiddeld $0,4 \text{ kg d.s.}$ per $\text{kg NO}_3\text{-N}_{\text{verw}}$.

7.2.3 *Toepassing in de Nederlandse praktijk*

Op basis van de ontwerpbelasting kan de reactor van het denitrificerend fluidbedsysteem worden gedimensioneerd. Debietvariaties zijn geen bezwaar, omdat de recirculatie van het systeem zorgt voor een constant aanvoerdebiet. Ook $\text{NO}_3\text{-N}$ -variaties zijn geen bezwaar, omdat piekbelastingen geen rendementsverlies geven.

In hoofdstuk 6 zijn twee voorbeelden uitgewerkt, die aansluiten op de voorbeelden van het nitrificerend vastbedstelsysteem. Het DWA-debiet van de eerste voorbeeld-rwzi is 15.000 m³/d, de NO₃-N-concentratie 36 mg/l (bij DWA). Door het RWA-debiet van 3000 m³/h zijn de hydraulische randvoorwaarden bepalend voor het ontwerp en is het benodigde reactoroppervlak 125 m². De exploitatiekosten voor het denitrificerend fluidbedstelsysteem van deze voorbeeld-rwzi bedragen f 10,50/kg NO₃-N_{verw} (f 5,50 kapitaalslasten en f 5,-- bedrijfsvoeringskosten). Dit is veel hoger dan de f 7,50 die in de literatuurstudie is genoemd. Enerzijds wordt dit veroorzaakt doordat hij de voorbeeld-rwzi de reactor niet tot de ontwerp-NO₃-N-belasting kan worden belast als gevolg van de hydraulische randvoorwaarden, anderzijds blijkt het energieverbruik veel hoger uit te vallen door de continue zand/biomassascheiding.

Het ruimtebeslag van alleen de reactor van het denitrificerend fluidbedstelsysteem van de voorbeeld-rwzi bedraagt 0,24 m² per kg NO₃-N_{verw}/d. Dit komt overeen met het in de literatuurstudie genoemde ruimtebeslag van 0,25 m² per kg NO₃-N_{verw}/d. Het verwachte totale ruimtebeslag bedraagt 0,49 m² per kg NO₃-N_{verw}/d en is hoger dan het in de literatuurstudie genoemde totale ruimtebeslag van 0,33 m² per kg NO₃-N_{verw}/d.

Het tweede voorbeeld uit hoofdstuk 6 gaat uit van hetzelfde DWA-debiet en RWA-debiet, maar nu met een NO₃-N-concentratie van 15,3 mg/l bij DWA. De hydraulische belasting blijft bepalend voor het ontwerp, zodat het ontwerp van de reactor niet wijzigt. Door de lagere NO₃-N-concentratie wordt minder NO₃-N verwijderd, zodat de exploitatiekosten per kg NO₃-N_{verw} stijgen naar f 23,--. Ook het ruimtebeslag wordt ongunstiger en bedraagt voor alleen de reactor 0,57 m² per kg NO₃-N_{verw}/d en voor het totaal 1,1 m² per kg NO₃-N_{verw}/d.

7.3 Denitrificerend vastbedstelsysteem

7.3.1 Bedrijfsvoering

Het denitrificerend vastbedstelsysteem is gevoelig voor dichtgroeien ("clogging"). Essentieel bij het voorkomen van dichtgroeien is een voldoende grote hydraulische belasting. Bij de praktijkproef is gebleken dat een goede bedrijfsvoering mogelijk is als wordt voldaan aan de volgende criteria:

- een vastbedhoogte van minimaal 2,2 meter;
- een minimale gemiddelde hydraulische belasting van 7 m³/(m².h);
- een minimale hydraulische belasting van 5 m³/(m².h);
- een maximale hydraulische belasting van 14 m³/(m².h);
- een spoelingsfrequentie van drie keer per twee dagen;
- de methanoldosering in een deelstroom van 80% in het bed.

Bij vergelijking van deze criteria met de door Degrémont opgegeven dimensioneringsgrondslagen (paragraaf 3.4.1) valt op dat:

- de minimale hydraulische belasting is verhoogd van 1,5 m³/(m².h) naar 5 m³/(m².h);
- de toegelaten maximale hydraulische belasting is verhoogd van 10 naar 14 m³/(m².h);
- een randvoorwaarde voor een minimale gemiddelde hydraulische belasting is toegevoegd;
- het bed drie keer per twee dagen moet worden gespoeld in plaats van iedere twee dagen;
- de deelstroom waarin de methanoldosering plaatsvindt, is teruggebracht van 95% naar 80%.

Deze wijzigingen bleken noodzakelijk om dichtgroeien van het bed te voorkomen.

Ter controle op dichtgroei van het bed moet na iedere spoeling de drukval over het bed worden gecontroleerd. Zonodig moet een extra spoeling worden uitgevoerd.

7.3.2 Resultaten

De ontwerpbelasting ($1,8 \text{ kg NO}_3\text{-N}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$) kan als gemiddelde belasting worden aangehouden. Piekbelastingen tot tenminste $4,5 \text{ kg NO}_3\text{-N}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ worden door het systeem verwerkt bij gelijkblijvend rendement. Het rendement bedraagt 95% bij een methanoldosering van $2,85 \text{ kg/kg NO}_3\text{-N}_{\text{verw}}$. Dit is iets hoger dan het door Degrémont opgegeven rendement (90%).

Het denitrificerend vastbedstelsysteem gevuld met Biolite met een diameter van 2 tot 7 mm, verwijdert gemiddeld ongeveer 10 mg/l van de aangevoerde zwevend stof. Met het spoelwater wordt gemiddeld $1,1 \text{ kg d.s. afgevoerd per kg NO}_3\text{-N}_{\text{verw}}$.

7.3.3 Toepassing in de Nederlandse praktijk

De hydraulische randvoorwaarden van het denitrificerend vastbedstelsysteem hebben tot gevolg dat een recirculatie nodig is om bij DWA de hydraulische belasting op het minimaal gemiddelde van $7 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ te houden, en tijdens de nachtperiode op de minimale $5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$.

De reactor wordt gedimensioneerd met behulp van de ontwerpbelasting. Een buffertank is niet noodzakelijk omdat $\text{NO}_3\text{-N}$ -piekbelastingen zonder rendementsverlies kunnen worden opgevangen en de recirculatie zorgt voor een voldoende hydraulische belasting.

In hoofdstuk 6 zijn dezelfde voorbeelden uitgewerkt als voor het denitrificerend fluidbedstelsysteem. De eerste voorbeeld-rwzi heeft een debiet van $15.000 \text{ m}^3/\text{d}$ bij DWA, een $\text{NO}_3\text{-N}$ -concentratie van 36 mg/l (bij DWA) en een RWA-debiet van $3000 \text{ m}^3/\text{h}$. Voor deze voorbeeld-rwzi is de hydraulische belasting bepalend voor het ontwerp. Het benodigde reactoroppervlak bedraagt 214 m^2 .

De exploitatiekosten van het denitrificerend vastbedstelsysteem voor deze voorbeeld-rwzi bedragen $f 10,-/\text{kg NO}_3\text{-N}_{\text{verw}}$ ($f 6,-$ kapitaalslasten, $f 4,-$ bedrijfsvoeringskosten). Dit is veel hoger dan de schatting die in de literatuurstudie is gemaakt ($f 6,-/\text{kg NO}_3\text{-N}_{\text{verw}}$). De belangrijkste reden voor deze hogere kosten is, dat de reactor bij de voorbeeld-rwzi niet tot de ontwerp- $\text{NO}_3\text{-N}$ -belasting kan worden belast vanwege de hydraulische randvoorwaarden.

Het ruimtebeslag van alleen de reactor van het denitrificerend vastbedstelsysteem van de voorbeeld-rwzi bedraagt $0,42 \text{ m}^2$ per $\text{kg NO}_3\text{-N}_{\text{verw}}/\text{d}$. Dit komt overeen met de waarde die resulteerde uit de literatuurstudie ($0,4 \text{ m}^2$ per $\text{kg NO}_3\text{-N}_{\text{verw}}/\text{d}$). Het totale ruimtebeslag van het systeem bedraagt $1,5 \text{ m}^2$ per $\text{kg NO}_3\text{-N}_{\text{verw}}/\text{d}$, dit is veel hoger dan de $0,5 \text{ m}^2$ per $\text{kg NO}_3\text{-N}_{\text{verw}}/\text{d}$ die in de literatuurstudie is aangehouden.

Bij de tweede voorbeeld-rwzi ($\text{NO}_3\text{-N}$ -concentratie gaat terug naar 15,3 mg/l bij DWA) blijft de reactor even groot vanwege de hydraulische randvoorwaarden. Door de lagere $\text{NO}_3\text{-N}$ -concentratie wordt met deze evengrote reactor minder $\text{NO}_3\text{-N}$ verwijderd. De exploitatiekosten per $\text{kg NO}_3\text{-N}$ stijgen hierdoor naar $f 20,-$. Het ruimtebeslag van alleen de reactor stijgt naar $1,0 \text{ m}^2$ per $\text{kg NO}_3\text{-N}_{\text{verw}}/\text{d}$ en dat van het totale systeem naar $3,4 \text{ m}^2$ per $\text{kg NO}_3\text{-N}_{\text{verw}}/\text{d}$.

7.4 Conclusies

- * De onderzochte compactsystemen kunnen worden toegepast op praktijkschaal, mits wordt voldaan aan de randvoorwaarden voor de bedrijfsvoering.
- * Vooralsnog vereisen de compactsystemen een wekelijkse controle op een goed functioneren.

- * De ontwerp-stikstofverwijdering van de compactsystemen komt overeen met de door de leveranciers opgegeven waarden. De maximale stikstofverwijdering van de denitrificerende compactsystemen ligt veel hoger dan deze opgegeven waarden.
- * Het rendement van stikstofverwijdering bedraagt bij een goed ontwerp:
 - 85-90% voor het nitrificerend vastbedstelsysteem;
 - 95% voor de denitrificerende compactsystemen.
- * De exploitatiekosten per kg $\text{NH}_4\text{-N}_{\text{verw}}$ of $\text{NO}_3\text{-N}_{\text{verw}}$ zijn sterk afhankelijk van de situatie en liggen in het gunstigste geval rond f 11,- per kg $\text{NH}_4\text{-N}_{\text{verw}}$ of $\text{NO}_3\text{-N}_{\text{verw}}$. Dit is duidelijk hoger dan de f 5,- tot f 7,50 per kg $\text{NH}_4\text{-N}_{\text{verw}}$ of $\text{NO}_3\text{-N}_{\text{verw}}$ die in de literatuurstudie is genoemd. In een situatie met minder geconcentreerd afvalwater kunnen de genoemde kosten nog aanmerkelijk hoger liggen. Daarnaast heeft verhoging van de methanolprijzen direct invloed op de exploitatiekosten van de denitrificerende systemen. Verhoging van de energieprijzen heeft met name effect op de exploitatiekosten van het fluidbedstelsysteem, omdat dit systeem veruit het grootste energieverbruik heeft.
- * Uit kosten oogpunt kan worden overwogen om in RWA-situaties een deel van het afvalwater te by-passen. Om de kosten verder te reduceren kan bij het nitrificerend vastbedstelsysteem eventueel worden afgezien van een buffertank. Het $\text{NH}_4\text{-N}$ rendement zakt in dat geval van 90% naar ongeveer 85%. Bij hogere nitraatconcentraties kunnen de denitrificerende systemen op een hogere stikstofverwijdering worden gedimensioneerd. Daartoe is het dan zinvol specifiek aanvullend onderzoek uit te voeren.
- * Het ruimtebeslag van compactsystemen inclusief randvoorzieningen ligt voor het nitrificerend vastbedstelsysteem in het gunstigste geval rond 3,5 m² per kg $\text{NH}_4\text{-N}_{\text{verw}}/\text{d}$. Dit is veel hoger dan het ruimtebeslag dat in de literatuurstudie is genoemd (0,55 m² per kg $\text{NH}_4\text{-N}_{\text{verw}}$). Voor het denitrificerend fluidbedstelsysteem blijkt het totale ruimtebeslag in een gunstige situatie ongeveer 0,5 m² per kg $\text{NO}_3\text{-N}_{\text{verw}}/\text{d}$ te bedragen. Dit is hoger dan de 0,33 m² per kg $\text{NO}_3\text{-N}_{\text{verw}}/\text{d}$ waar in de literatuurstudie van is uitgegaan. Het totale ruimtebeslag van het denitrificerend vastbedstelsysteem is in een gunstige situatie ongeveer 1,5 m² per kg $\text{NO}_3\text{-N}_{\text{verw}}/\text{d}$ en daarmee eveneens veel groter dan het ruimtebeslag dat op grond van de literatuurstudie werd verwacht (0,5 m² per kg $\text{NO}_3\text{-N}_{\text{verw}}/\text{d}$).

