

1996-21_verwijdering-ammonium-slibgistingwater


stowa

**Verwijdering van ammonium
uit slibgistingwater met
het Anammox-proces**

Haalbaarheidsstudie

96-21

Verwijdering van ammonium uit slibgistingwater met het Anammox-proces



Haalbaarheidsstudie

96-21

Publikaties en het publikatieoverzicht
van de Stowa kunt u uitsluitend
bestellen bij:
Hageman Verpakkers BV
Postbus 281
2700 AC Zoetermeer
tel. 079-3611188
fax 079-3613927
o.v.v. ISBN- of bestelnummer en
een duidelijk afleveradres.
ISBN nr. 90.74476.55.4

INHOUDSOPGAVE

TEN GELEIDE	ii
SAMENVATTING	1
1 INLEIDING	2
2 ACHTERGROND	3
2.1 Stikstofverwijdering	
2.2 Microbiële achtergrond van het Anammoxproces	
3 OPZET VAN HET ONDERZOEK	8
3.1 Algemene opzet	
3.2 Batch-experimenten	
3.3 Fluïde-bedreactor	
3.4 Sequencing-batchreactor	
4 RESULTATEN	15
4.1 Batch-experimenten	
4.2 Fluïde-bedreactor	
4.3 Sequencing-batchreactor	
5 EVALUATIE	27
6 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	31
7 LITERATUUR	32
BIJLAGEN: Bijlage 1 herkomst getalwaarden tabel 8	33
Bijlage 2 herkomst getalwaarden tabel 9	35

Ten geleide

Bij de gangbare biologische stikstofverwijdering uit afvalwater worden de gereduceerde stikstofverbindingen onder verbruik van zuurstof geoxydeerd tot nitraat, waarna vervolgens dit nitraat met een koolstofbron als electronendonor wordt gereduceerd tot stikstofgas.

Een nieuwe ontwikkeling op dit gebied is een biologisch proces waarbij onder zuurstofloze omstandigheden ammonium met behulp van nitraat wordt omgezet in stikstofgas. Dit bij Gist-brocades ontdekte Anammox-proces is zeer interessant als alternatief voor bestaande processen die afvalstromen met hoge stikstofgehalten behandelen. Toepassing van dit proces zou dan een volledige omzetting van ammoniak kunnen realiseren zonder toevoeging van methanol of C-bron, geen interferentie met biologische defosfatering en met besparing op de beluchtingskosten.

Het thans voorliggende rapport beschrijft onderzoek naar de technische haalbaarheid van het proces voor het slibgistingwater van een rwzi (van het slibverwerkingsbedrijf van de rwzi Dokhaven) in verschillende reactortypen. Het Anammox-proces blijkt in staat met hoge rendementen ammonium te verwijderen uit slibgistingwater.

De werkzaamheden werden door het bestuur van de STOWA opgedragen aan de vakgroep Microbiologie en Enzymologie van de Technische Universiteit Delft (projectteam bestaande uit dr.ir. M.S.M. Jetten, ing. E. van Gerven, Ping Zheng MSc en ir. M. Strous). Het project werd namens de STOWA begeleid door een commissie bestaande uit ir. W.G. Werumeus Buning (voorzitter), ing. R. van Dalen, mw.dr. M.M.A. Ferdinandy, ir. J.W. Mulder, mw.ir. C.A. Uijterlinde en ir. P.C. Stamperius.

Utrecht, september 1996

De directeur van de STOWA

drs. J.F. Noorthoorn van der Kruijff

SAMENVATTING

In verband met de effluenteis van $N_{\text{tot}} < 10$ mg/l voor stikstof wordt gezocht naar manieren om geconcentreerde stikstofstromen apart van de hoofdstroom te behandelen. In dit onderzoek is de haalbaarheid van ammoniumverwijdering uit slibgistingswater met behulp van het zogenaamde Anammoxproces onderzocht. Het Anammoxproces is een omzetting, waarbij onder anaërobe omstandigheden ammonium met behulp van nitriet (of nitraat) wordt omgezet naar stikstofgas. Omdat het Anammoxproces autotroof is, kan een volledige omzetting van ammonium naar stikstofgas worden gerealiseerd zonder toevoeging van methanol of BZV. Gezien de hoge capaciteit ($2,6 \text{ kg } N_{\text{tot}}/\text{m}^3_{\text{reactor}}$ per dag) van het proces, leent het Anammoxproces zich voor het ontwerp van compacte installaties. Het Anammoxproces is bij DSM en Gist-Brocades op pilot-plant schaal toegepast voor de verwijdering van ammonium uit industriële afvalstromen.

In drie typen experimenten zijn de verwijdering van ammonium en nitriet, de slibeigenschappen, de reactor-eigenschappen en de overige procesparameters voor de verwijdering van ammonium uit slibgistingswater met behulp van het Anammoxproces onderzocht. De experimenten zijn uitgevoerd in batches (2 maanden), in een fluïde-bedreactor (5 maanden) en in een sequencing-batchreactor (3 maanden).

Het slibgistingswater (niet gefilterd centraat uit de slibontwatering) voor de verschillende proeven werd regelmatig aangevoerd uit de slibverwerking Sluisjesdijk van de RWZI Dokhaven. Het gebruikte natriumnitriet werd in de juiste concentratie opgelost in gedemineraliseerd water. In de batch-experimenten werden het temperatuur- en pH-optimum van Anammoxproces in slibgistingswater onderzocht. In de continu-experimenten met de fluïde-bedreactor en sequencing-bedreactor werden de omzettingssnelheden, de verwijderingpercentages, de maximale stikstofvracht en de slibeigenschappen nader bestudeerd.

De resultaten van het onderzoek geven aan dat het Anammoxslib geen nadelig effecten ondervindt van het slibgistingswater en dat het Anammoxslib in staat is ammonium met behulp van toegevoegd nitriet uit het slibgistingswater te verwijderen tijdens batch- en continu-proeven. Het pH-optimum voor de verwijdering van ammonium uit slibgistingswater door het Anammoxproces ligt tussen de 7,0 en 8,5. Het temperatuuroptimum van de ammonium-omzetting in slibgistingswater ligt tussen 30 en 37 °C.

De proeven met de 2 l fluïde-bedreactor lieten zien dat het Anammoxslib ammonium voor $88 \pm 9 \%$ en nitriet voor $99 \pm 2 \%$ uit het slibgistingwater verwijderde. De stikstofvracht van de Anammox fluïde-bedreactor kon worden opgevoerd van $0,2 \text{ kg } N_{\text{tot}}/\text{m}^3_{\text{reactor}}$ per dag naar $2,6 \text{ kg } N_{\text{tot}}/\text{m}^3_{\text{reactor}}$ per dag. Dit is nog niet de maximale waarde, omdat de fluïde-bedreactor onder nitriet-limitatie bedreven werd. Met synthetisch afvalwater zijn reeds waarden bereikt van $5,1 \text{ kg } N_{\text{tot}}/\text{m}^3_{\text{reactor}}$ per dag. De toename in stikstofbelasting komt overeen met een toename in de omzettingssnelheid van $0,04 \text{ kg } N_{\text{tot}}/\text{kg DS}$ per dag naar $0,26 \text{ kg } N_{\text{tot}}/\text{kg DS}$ per dag.

In de sequencing-batchreactor verwijderde het Anammoxslib ammonium voor $81 \pm 1 \%$ en nitriet voor $99 \pm 1 \%$ uit het slibgistingwater. De maximale vracht, die bereikt werd na drie maanden, was $0,05 \text{ kg } N_{\text{tot}}/\text{m}^3_{\text{reactor}}$ per dag. De omzettingssnelheid op dat moment bedroeg $0,17 \text{ kg } N_{\text{tot}}/\text{kg DS}$ per dag. De sedimentatiesnelheid van het Anammoxslib in de sequencing-batchreactor lag tussen 21 en 90 m/h. Tijdens de sequencing-batch proeven onder nitriet-limitatie bleek dat de redox-potentiaal een eenvoudige en geschikte manier was om het Anammoxproces te controleren. Tevens werd in de sequencing-batch proeven waargenomen dat zuurstof remmend werkte op het Anammoxproces. Echter zo gauw de zuurstof uit de reactor was verdreven door extra flushen met Argongas, hervatte het Anammoxslib de omzetting van ammonium en nitriet.

De voornaamste conclusies uit het haalbaarheidsonderzoek zijn:

- Het Anammoxproces is zeer goed bruikbaar om ammonium uit slibgistingwater te verwijderen.
- Het temperatuur- en pH-optimum van het Anammoxproces liggen binnen de waarden gevonden voor slibgistingwater. Enige voorzorg om te grote afkoeling te voorkomen is gewenst.
- Verschillende reactorconfiguraties kunnen worden toegepast voor de omzetting van ammonium door het Anammoxproces.
- Met een fluïde-bedreactor kunnen hoge stikstofbelastingen worden toegepast, de sequencing-batchreactor is eenvoudiger en stabiel in de bedrijfsvoering.
- Redoxmetingen blijken een goede mogelijkheid voor monitoring en controle van het Anammoxproces.

Aanbevelingen voor procesgericht-onderzoek

- Vervolgonderzoek naar het koppelen van het Anammoxproces aan een stabiele nitrietvoorziening is zeer wenselijk.
- In verband met toepassing van het Anammoxproces is onderzoek naar schaalvergroting van het Anammoxproces wenselijk.

1 INLEIDING

Tijdens de vergisting van RWZI-slib worden grote hoeveelheden slibgistingswater geproduceerd. Dit slibgistingswater bevat relatief hoge concentraties ammonium (250-1000 mg N-NH₄⁺/l) en relatief weinig organisch koolstof, verder zijn de pH (7,8-8,4) en temperatuur (30-35 °C) relatief hoog. Tot nu toe wordt het slibgistingswater teruggedleid in de aërobe fase van RWZI's. Aparte verwijdering van ammonium uit het slibgistingswater zou de stikstofbelasting van RWZI's met 10-20% kunnen verminderen. Het onderzoek had als doel de technologische haalbaarheid van het Anammoxproces bij de verwijdering van ammonium uit slibgistingswater te bestuderen.

In het kader van een omvangrijk microbiologisch en bioprocestechnologisch onderzoekprogramma (1995-1999) op het gebied van stikstofverwijdering uit afvalwater, wordt door de vakgroep Microbiologie en Enzymologie van de Technische Universiteit Delft gewerkt aan een nieuw proces voor verwijdering van stikstof uit afvalwater via de anaërobe omzetting van ammonium met behulp van nitriet (of nitraat) tot stikstofgas (Anammox):



Het gaat hier om een microbiologische omzetting door een niet eerder beschreven bacteriesoort of bacterieconsortium. Het Anammoxproces heeft een grote potentie voor de toepassing als alternatief voor de bestaande zuiveringsmethoden voor afvalstromen met relatief hoge stikstofgehalten [Jetten *et al.*, 1996]. Het Anammoxproces is met succes bij DSM en Gist-Brocades toegepast voor de verwijdering van ammonium uit een reële afvalstroom en wordt al jaren stabiel bedreven in de pilot-plant van de Technische Universiteit Delft die gevoed wordt met afvalwater afkomstig van de Gist-Brocades gistproductiefabriek [Mulder *et al.*, 1995].

De haalbaarheidsstudie was onderverdeeld in drie fasen. In de eerste fase werd de ammonium- en nitrietverwijdering uit slibgistingswater in een aantal batch-experimenten onderzocht. Hierbij werden de optimale pH, temperatuur en nitrietconcentratie voor ammoniumverwijdering in het Anammoxproces bepaald. Daarna werd een fluïde-bedreactor opgestart met slib afkomstig uit de Anammox pilot-plant van de Technische Universiteit Delft. Deze fluïde-bedreactor werd gevoed met slibgistingswater uit de slibverwerking van Sluisjesdijk, waar het slib van de RWZI Dokhaven wordt vergist. De ammonium- en nitrietverwijdering in deze reactor werden gedurende 150 dagen gevolgd. Daarna werd ook een in sequencing-batchreactor (SBR) de verwijdering van ammonium en nitriet uit slibgistingswater onderzocht.

In hoofdstuk 2 van dit rapport wordt ingegaan op de achtergrond van het onderzoek en het Anammoxproces. In hoofdstuk 3 wordt de opzet van de experimenten beschreven. De resultaten van het onderzoek zijn weergegeven in hoofdstuk 4. De evaluatie van het onderzoek wordt beschreven in hoofdstuk 5. Tenslotte worden in hoofdstuk 6 de voornaamste conclusies en aanbevelingen van het onderzoek gepresenteerd.

2 ACHTERGROND

2.1 Stikstofverwijdering

De zorg voor de oppervlaktewaterkwaliteit stelt hoge eisen aan systemen voor afvalwaterzuivering. Een van de probleemgebieden is de efficiënte en economische verwijdering van stikstof-verbindingen uit industrieel en huishoudelijk afvalwater. Op vele manieren wordt geprobeerd goede oplossingen te vinden voor de stikstofverwijdering. Dit betreft processen voor nitrificatie, denitrificatie of combinaties daarvan, die met wisselend succes worden toegepast op drinkwater, grondwater en allerlei soorten afvalwater.

De huidige praktijk van stikstofverwijdering berust op aërobe nitrificatie gevolgd door anaërobe denitrificatie. In alle gevallen is men gedwongen ammonium tot nitraat te oxyderen met behulp van zuurstof en daarna het gevormde nitraat om te zetten tot stikstofgas met behulp van beschikbaar BZV uit het afvalwater of soms zelfs door een koolstofbron (bijv. methanol of acetaat) toe te voegen. Naast verbetering en optimalisatie van de bestaande processen is het echter wenselijk de technische en economische haalbaarheid van veelbelovende alternatieve processen te onderzoeken. Een van deze alternatieven is het Anammoxproces (ANAMMOX = ANaerobic AMMONium OXidation) [Jetten et al. 1996].

In het Anammoxproces wordt ammonium anaëroob geoxideerd met nitriet (of nitraat) als elektronenacceptor. Met nitriet verloopt het Anammoxproces sneller en stabielere dan met nitraat. Toepassing van het Anammoxproces kan een volledige omzetting van ammonium tot stikstofgas realiseren, zonder toevoeging van methanol en/of zonder BZV te gebruiken. *Indien nitraat als electronacceptor wordt gebruikt, is er wel een geringe hoeveelheid methanol of BZV nodig om nitraat eerst in nitriet om te zetten.* In alle gevallen zou men aanzienlijk besparen op de (kostbare) zuurstoftoevoer voor nitrificatie: Anammox kan hier een substantiële besparing leveren ten opzichte van een conventioneel nitrificatie-denitrificatiesysteem, toegepast op een N-rijke deelstroom.

Het Anammoxproces is een proces dat in potentie kan worden gebruikt voor een breed scala van huishoudelijke, agrarische en industriële stikstofhoudende afvalstromen. Gezien de hoge volumecapaciteit ($5 \text{ kg N}_{\text{tot}}/\text{m}^3_{\text{reactor}}$ per dag) en hoge omzettingssnelheden ($0,25 \text{ kg N}_{\text{tot}}/\text{kg DS}$ per dag) die reeds zijn gerealiseerd, leent het Anammoxproces zich voor ontwerp van zeer compacte installaties [Van de Graaf et al., 1996]. Deze installaties kunnen zelfs bij zeer beperkte ruimte gemakkelijk ter plekke geïnstalleerd worden. Daarnaast schaaft Anammox zich in de rij van biotechnologische processen die toegepast kunnen worden voor het helpen sluiten van de stikstofstroom op locatie.

2.2 Microbiële achtergrond van het Anammoxproces

Reeds in 1977 poneerde Broda op thermodynamische gronden dat er denitrificerende ammoniumoxyderende bacteriën zouden moeten bestaan en noemde hen de: "lithotrophs missing in nature" [Broda, 1977]. De verandering in Gibbs vrije energie van de ammoniumoxydatie met behulp van nitriet (of nitraat) verschilt niet veel van die met zuurstof als terminale electronacceptor.



Enkele jaren geleden werd bij Gist-Brocades ontdekt dat aanzienlijke hoeveelheden ammonium uit hun anaërobe denitrificerende fluïde-bedreactor verdwenen [Mulder et al., 1995]. Gelijktijdig nam men een toename in de nitraatconsumptie en in de stikstofproductie waar. De stoichiometrie van de reactie werd vastgesteld op:



Door middel van enkele experimenten, die de stoichiometrie van de reactie bevestigden en waarin men aantoonde dat deze activiteit geïnactiveerd kon worden door verhitting, bestraling met gammastralen en antibiotica, kon worden vastgesteld, dat het hier om een geheel nieuw biologisch proces ging, zoals dat indertijd door Broda werd gepostuleerd [Van de Graaf et al., 1996]. Het proces is inmiddels onder de naam Anammox gepatenteerd (EP 88200204).

Sinds 1989 is het Anammoxproces bij de vakgroep Microbiologie en Enzymologie van de Technische Universiteit Delft bestudeerd in het kader van een door de Stichting Technische Wetenschappen (STW) gesubsidieerd promotie-onderzoek dat in september 1995 voor vier jaar werd verlengd. Uit deze studies is bekend geworden dat het Anammoxproces inderdaad strikt biologisch en strikt anaëroob is en veel sneller verloopt met nitriet dan met nitraat [Van de Graaf et al., 1995].

Het proces is in de anaërobe denitrificerende fluïde-bedreactor (waarin gevoed wordt met een ammoniumhoudend effluent uit een methanogene reactor en suppletie met nitraat), redelijk stabiel. Echter, aangezien het ondanks vele pogingen nog niet gelukt is de deelprocessen te identificeren en de verantwoordelijke bacteriën te identificeren, geschiedt de besturing volledig empirisch.

Inmiddels is het wel gelukt om de verantwoordelijke bacteriën op te hopen in een fluïdebedreactor die gevoed wordt met een mineraal medium met ammonium en nitriet als enige energiebron en elektronen-acceptor en CO₂ als enige koolstofbron [Van de Graaf et al., 1996].

Niet alleen de groeisnelheid, maar ook de celopbrengst van de verantwoordelijke microbiële populatie is uitzonderlijk laag. Een duidelijk voordeel hiervan is dat in een eventueel proces de overtollige productie van bacterieslib gering zal zijn. Een evident nadeel is de lange aanlooptijd voordat voldoende biomassa is geproduceerd om de reactor optimaal te laten functioneren. De omzettingssnelheden van 0,25 kg N_{tot}/kg DS/dag die bereikt worden, zijn 20 maal hoger dan de snelheden (0,012 kg N_{tot}/kg DS/dag) van conventionele nitrificatie-systemen. Om het proces snel op te starten zijn dan grote hoeveelheden entmateriaal noodzakelijk. Het is echter te verwachten dat door een juiste keuze van substraten een veel hogere groeisnelheid van de mengpopulatie bereikt kan worden [Van de Graaf et al., 1996].

3 OPZET VAN HET ONDERZOEK

3.1 Algemene opzet

Het onderzoek bestond uit drie fasen. In de eerste fase werd in een aantal batch-experimenten de omzetting van ammonium en nitriet in slibgistingwater door het Anammoxslib gevolgd. Daarna werden de verwijdering van ammonium en nitriet uit slibgistingwater bestudeerd in een fluïde-bedreactor en tenslotte werd deze verwijdering ook bestudeerd in een sequencing-batchreactor (SBR).

Het slibgistingwater (niet gefiltreerd centraat van de slibontwatering) werd aangevoerd uit de slibverwerking Sluisjesdijk van de RWZI Dokhaven. De gemiddelde samenstelling van het slibgistingwater uit Sluisjesdijk staat vermeld in tabel 1.

Ammonium-, nitriet- en nitraatconcentraties werden colorimetrisch bepaald volgens de methodes van Fawcett & Scott (1960), Gries-Romijn-Van Eck (1966) en Cataldo (1975). Het drooggewicht werd bepaald door overnacht te drogen bij 60 °C en daarna 1 uur te verhitten bij 600 °C (as-gehalte).

Tabel 1. Gemiddelde samenstelling van het slibgistingwater van Sluisjesdijk

NH ₄ ⁺ -N	1.000 mg / l
Kjeldahl-N	1.053 mg / l
totaal-P	27 mg / l
zwevend stof	56 mg / l
HCO ₃ ⁻	4.100 mg / l
BZV	230 mg / l
CZV	810 mg / l
pH	7,7 - 8,2

3.2 Batch-experimenten

De verwijdering van ammonium uit slibgistingwater door het Anammoxproces werd in verschillende batch-experimenten bestudeerd. Daarbij werd geprobeerd inzicht te krijgen in de ammonium-, nitriet-, temperatuur- en pH-waarden waarbij het Anammoxproces in slibgistingwater optimaal functioneerde.

In de eerste serie batch-experimenten werd slibgistingwater met 500 mg/l KHCO₃-oplossing verdund (volgens tabel 2a) om zodoende een reeks met aflopende

ammoniumconcentraties te krijgen. Aan deze flesjes werd 60 mg $\text{NO}_2\text{-N/l}$ (electronacceptor) en 2 ml Anammoxslib uit de pilot-plantreactor (24,8 mg DS/ml) toegevoegd. De pH bedroeg 7,9, nadat de flesjes anaëroob gemaakt waren door 30 minuten te doorborrelen met een Argon- CO_2 (95/5%) mengsel. De flesjes werden 30 dagen geïncubeerd bij 35 °C, totdat het grootste deel van het ammonium en nitriet omgezet was. Op verschillende tijdstippen (meestal om de 4 dagen) werden monsters (0,5 ml) genomen en geanalyseerd op ammonium, nitriet en pH. Wanneer het nitriet volledig was omgezet, werd opnieuw 60 mg/l toegevoegd.

In de tweede serie werd 8 ml slibgistingswater met 50 ml 500mg/l KHCO_3 -oplossing verdund en werden verschillende hoeveelheden nitriet als electronacceptor (tabel 2b) en 2 ml Anammoxslib uit de Anammox pilot-plantreactor (24,8 mg DS/ml) toegevoegd. De pH bedroeg 7,9, de flesjes werden zoals hierboven beschreven anaëroob gemaakt. Wanneer het nitriet volledig was omgezet, werd opnieuw een hoeveelheid nitriet (26-127 mg/l) toegevoegd.

Voor het vaststellen van het pH- en temperatuuroptimum voor de verwijdering van ammonium en (toegevoegd) nitriet uit slibgistingswater, zijn verschillende reeksen batch-experimenten ingezet. In de pH- serie (pH 6-10) werd 8 ml slibgistingswater met 500 mg/l KHCO_3 - of 650 mg/l K_2CO_3 -oplossing verdund om een ammoniumconcentratie van 100 ± 10 mg $\text{NH}_4\text{-N/l}$ te krijgen. Aan deze flesjes werden 100 mg $\text{NO}_2\text{-N/l}$ (electronacceptor) en 2 ml Anammoxslib uit de Anammox pilot-plant reactor (21,2 mg DS/ml) toegevoegd. De flesjes werden anaëroob gemaakt door 30 min door te borrelen met een Argon- CO_2 (95/5%) mengsel; daarna werd de pH opnieuw gemeten en zonodig bijgesteld. Op verschillende tijdstippen (meestal om de 2 dagen) werden monsters (0,5 ml) genomen en geanalyseerd op ammonium, nitriet en pH.

In de temperatuur-serie (4-65 °C) werd 8 ml slibgistingswater met 50 ml 500 mg/l KHCO_3 -oplossing verdund tot een ammoniumconcentratie van 100 ± 10 mg N/l. Hieraan werden 100 mg $\text{NO}_2\text{-N/l}$ en 2 ml Anammoxslib (21,2 mg DS/ml) toegevoegd. De flesjes werden anaëroob gemaakt door 30 min te doorborrelen met een Argon- CO_2 (95/5%) mengsel. De flesjes werden weggezet in incubatoren met verschillende temperaturen.

Tabel 2a. Samenstelling van de verdunningsserie van slibgistingwater met aflopende ammonium-concentraties.

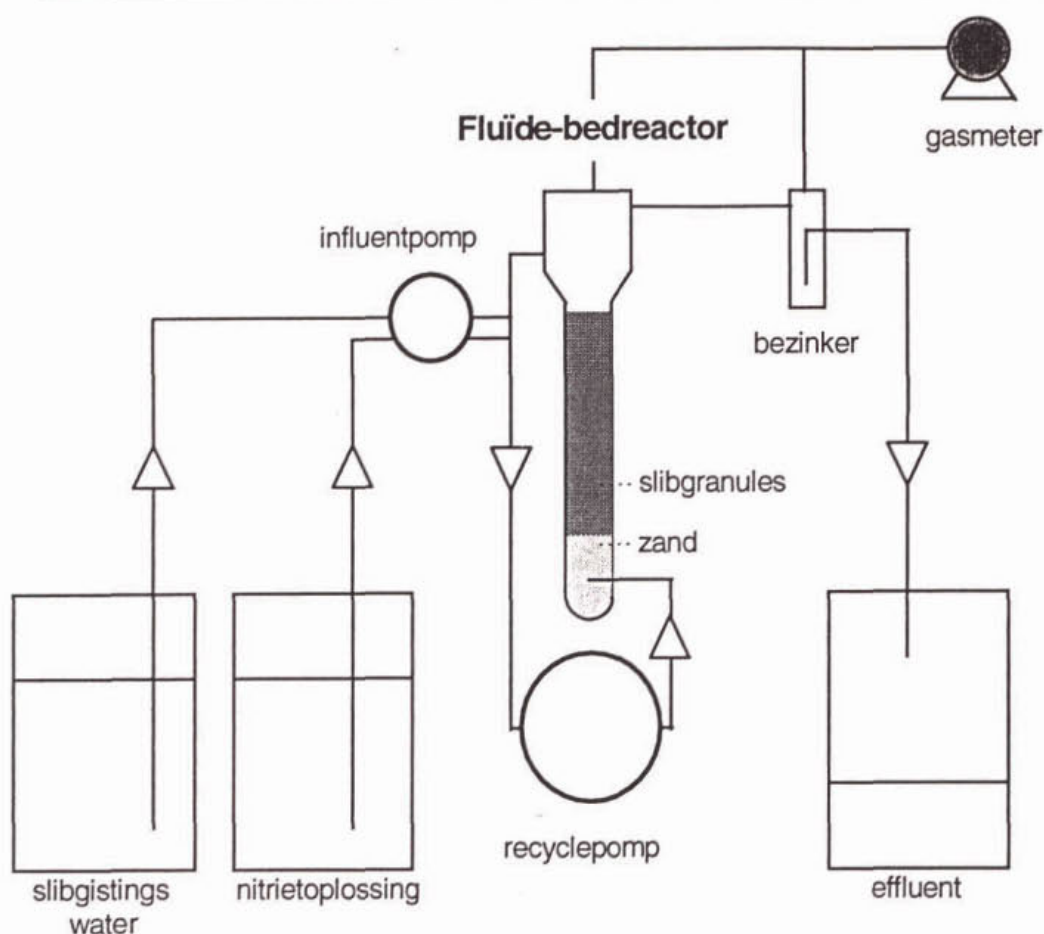
Monster:	1	2	3	4	5	6	
Slibgistingwater	58	50	40	20	8	4	ml
500 mg/l KHCO ₃	0	8	18	38	50	54	ml
Anammoxslib	2	2	2	2	2	2	ml
[NH ₄ ⁺]	820	760	589	272	112	57	mg N/l
[NO ₂ ⁻]	62	63	62	62	62	59	mg N/l

Tabel 2b. Samenstelling van de verdunningsserie met aflopende nitrietconcentratie

Monster:	1	2	3	4	5	6	
Slibgistingwater	8	8	8	8	8	8	ml
500 mg/l KHCO ₃	50	50	50	50	50	50	ml
Anammoxslib	2	2	2	2	2	2	ml
[NH ₄ ⁺]	123	114	115	116	117	122	mg N/l
[NO ₂ ⁻]	123	99	71	46	26	0	mg N/l

3.3 Experiment met de fluïde-bedreactor

Een schematisch diagram van de fluïde-bedreactor is weergegeven in figuur 1. De fluïde-bedreactor bestond uit een glazen kolom van 100 cm bij 5 cm (interne diameter) bij de bodem, aan de top was de interne diameter 8 cm. Het totaalvolume bedroeg 2,5 liter, waarvan 2,25 l voor vloeistof en 0,25 l voor de gasfase.



Figuur 1: Schematische weergave van de Anammox fluïde-bedreactor.

Het niet-gefiltreerde slibgistingswater werd eens per maand uit Sluisjesdijk aangevoerd en gekoeld bewaard. Het ammoniumgehalte varieerde van batch tot batch (1122-2100 mg N/l). Nitriet werd via een geconcentreerde oplossing (380-1428 mg N/l) aan de reactor toegevoegd. De bodem van de fluïde-bedreactor was gevuld met 0,5 kg (310 ml) zand (0,3-0,6 mm diameter). Op dit zandbed werd 1,2 l Anammoxslib gebracht. Het Anammoxslib was afkomstig uit de pilot-plantreactor van de Technische Universiteit Delft, die gevoed wordt met afvalwater van Gist-Brocades. De reactor werd anaëroob gemaakt door 30 minuten te flushen met een Argon/CO₂-mengsel (95/5%). Ook de nitrietoplossing en het slibgistingswater werden anaëroob gemaakt door 30 minuten te flushen met dit gasmengsel.

Gedurende 150 dagen werden monsters genomen en geanalyseerd op ammonium, nitraat en nitriet. De gasproductie en pH werden continu geregistreerd met een natte gasmeter en pH-elektrode. De voeding van de reactor geschiedde continu. De pompsnelheden (1 tot 10 ml/min) van de nitrietoplossing en het slibgistingwater werden echter wel elke dag gemeten en zonodig aangepast. Het effluent werd opgevangen in een maatcilinder. De recyclepompsnelheid was 720 ml per min om het bed op 50% expansie te houden. De recycleverhouding lag tussen de 72 en 720. De kolom werd ingepakt in zwart plastic om de Anammoxbiomassa te beschermen tegen eventuele schadelijk gevolgen van invallend licht [Van de Graaf et al. 1996]. De kolom werd op 35 °C gehouden door middel van een watermantel en thermostaatbad.

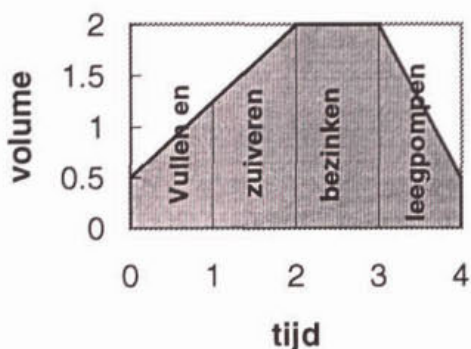
3.4 Experiment met een sequencing batchreactor

3.4.1 Algemene opzet van de sequencing-batchreactor.

In de laatste fase van het onderzoek werd het Anammoxproces bestudeerd in een sequencing-batchreactor (SBR), omdat zo'n reactor een andere procesvoering heeft dan een fluïde-bedreactor, fixed-bedreactor en gasliftreactor.

Een SBR heeft doorgaans de volgende procesvoering. Eerst wordt de reactor gevuld met afvalwater, daarna wordt er gemengd en wordt het afvalwater door het aanwezig slib gezuiverd. Vervolgens wordt de roerder stilgezet, zodat het slib kan bezinken. Tenslotte wordt het schone water afgepompt. Bij de Anammox-SBR is er voor een andere procesvoering gekozen. Met de standaard procesvoering zou de nitrietconcentratie aan het begin van iedere zuiveringsperiode te hoog zijn. Uit de batch-proeven was het al bekend dat hoge nitrietconcentraties (> 70 mg N/l) het Anammoxproces remmen. Daarom zijn bij de Anammox SBR's de vul- en zuiveringperiode gecombineerd (figuur 2). De vulsnelheid werd zo gekozen dat het aanwezige slib het toegevoerde nitriet direct kon omzetten en zich geen nitriet ophoopte. Verder biedt een SBR betere mogelijkheden om het Anammoxslib te karakteriseren op bezinkbaarheid in de afwezigheid van dragermateriaal. Dit is van belang voor een goede slibretentie.

De mogelijkheid tot het controleren van het Anammoxproces in de praktijk is tot nu toe nog niet onderzocht. Aangezien redox-metingen bij het onderzoek naar biologische fosfaatverwijdering onder denitrificerende condities succesvol zijn toegepast, is in de Anammox SBR de geschiktheid van redoxpotentiaalmeting als monitor en procescontrole-mogelijkheid onderzocht.



Figuur 2: Verloop van een cyclus van een Anammox sequencing batch reactor. Het vullen van de reactor en de omzetting van ammonium en nitriet tot stikstofgas vinden gelijktijdig plaats. Hierdoor blijft de nitrietconcentratie in de reactor laag. Dat is belangrijk omdat nitriet in hogere concentraties (> 70 mg N/l) toxisch is voor het Anammox slib. Volume en tijd zijn hier aangegeven in arbitraire eenheden.

3.4.2 Experimentele opzet

Er zijn twee 2-liter Anammox SBR's gedurende drie maanden bedreven. De SBR1 werd gevoed met slibgistingwater uit Sluisjesdijk en met een synthetische nitrietoplossing. De SBR2 werd gevoed met "synthetisch slibgistingwater": een ammonium-oplossing met daarin ook toegevoegd nitriet. Op deze manier kon inzicht worden verkregen in de invloed van slibgistingwater op de structuur van het Anammoxslib. De SBR's werden dun beënt: SBR1: 1,03 g DS en SBR2: 0,43 g DS per totale reactor.

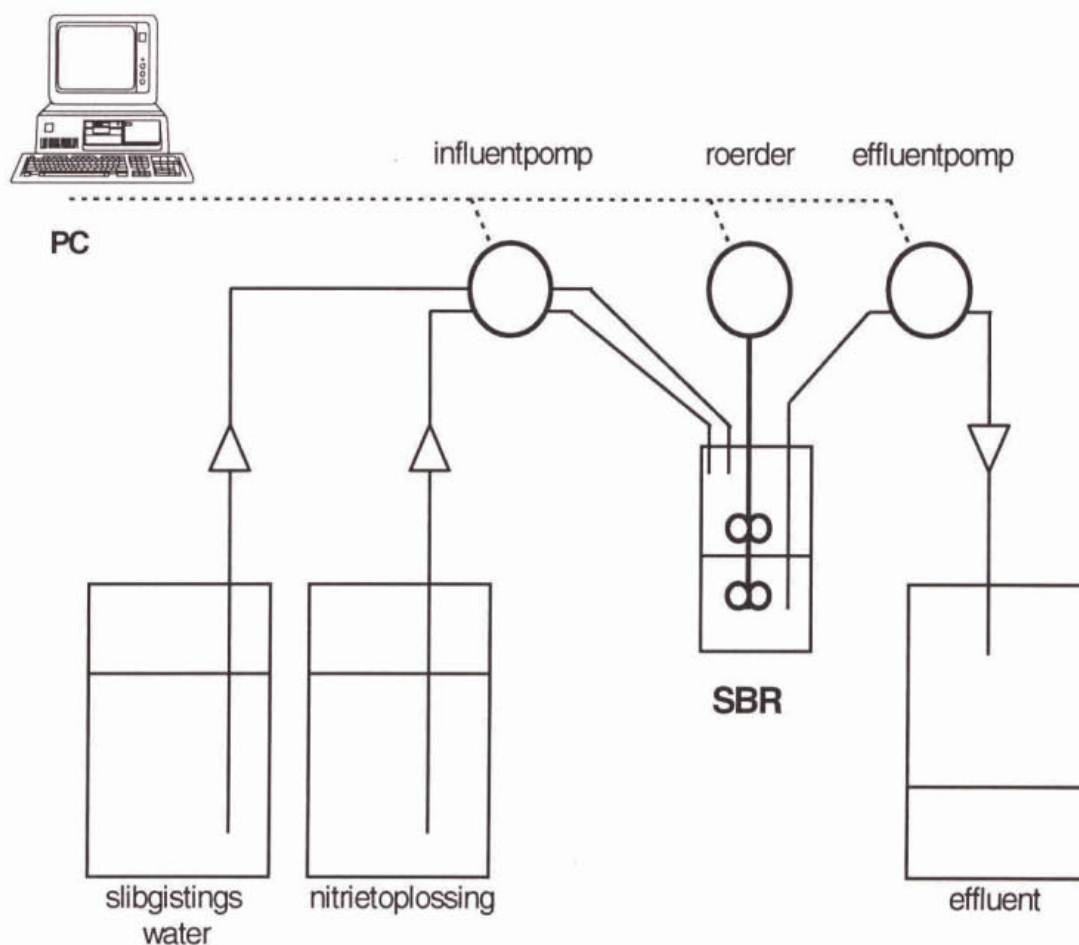
De Anammox-SBR's werden twee maal per dag gevuld en leeggepompt. Het vuldebiet van SBR1 bedroeg 130 ml/uur. Dit debiet was zo gekozen dat zich geen nitriet zou ophopen; alle binnenkomende nitriet werd direct omgezet. Het vuldebiet van SBR2 bedroeg, vlak na beënting 27 ml/uur. In de loop van drie maanden werd het vuldebiet van SBR2 stapsgewijs verhoogd naar 57 ml/uur. Het vuldebiet van SBR2 was lager omdat SBR2 was beënt met minder Anammoxslib. Bij een te hoog vuldebiet zou zich dan alsnog nitriet in de reactor ophopen. De nitriet- en ammoniumconcentraties in het influent bedroegen 64 mg N/l. Het slibgistingwater werd hiertoe verdund. Deze concentraties waren zodanig gekozen dat het aanwezige Anammoxslib alle aangevoerde ammonium en nitriet zou kunnen omzetten¹. De omzettingnelheid van het entmateriaal bedroeg namelijk 0,022 kg NH₄⁺-N/kg DS per dag.

¹ berekening van ammoniumbelasting van Anammox SBR.

130 ml/uur x 24 uur/dag x 64 mg/l NH₄⁺-N x 1/1000 l/ml x 1/1000 g/mg x 1/1,03 g DS = 0,022 kg NH₄⁺-N/kg DS per dag

Het volume van de SBR's steeg daarbij van 0,5 l tot 1,96 l in SBR1 en 1,16 l in SBR2. De roersnelheid bedroeg 100 rpm. Na de vulperiode van 11,5 uur werden de roerders van de SBR's gedurende 15 min stilgezet, zodat het Anammoxslib kon bezinken. Tijdens het bezinken werd geen slibgistingwater toegevoegd. Na deze 15 minuten werd begonnen met afpompen, waarbij het volume weer werd teruggebracht tot 0,5 l. SBR1 werd voorzichtig in 45 minuten leeggepompt, terwijl SBR2 in 1 minuut ruw werd afgepompt. Door het ruwe afpompen ontstonden er wervels in SBR2, die ervoor zorgden dat slecht-beschikbaar slib "opwaaide" en alsnog werd afgepompt. Door het ruw afpompen werd in SBR2 strenger geselecteerd op bezinkbaarheid. Na het afpompen begon de volgende cyclus. Een flow-sheet van een Anammox-SBR is weergegeven in figuur 3.

De bezinksnelheid van het Anammoxslib uit de SBR's werd gravimetrisch bepaald. De gebruikte redoxelectrode bestond uit een platina electrode. De redoxpotentiaal werd gemeten met een calomelelectrode als referentie.



Figuur 3: Schematische weergave van de Anammox sequencing batch reactor.

4 RESULTATEN

4.1 Batch-experimenten

De resultaten van de ammonium- en nitrietanalyses van de verschillende batch-experimenten zijn in Tabellen 3 en 4 weergegeven.

In de eerste reeks batch-experimenten werd bepaald tot welke ammoniumconcentratie de Anammoxreactie in het slibgistingswater nog plaatsvond. Tabel 3 geeft het verloop van de ammonium- en nitrietconcentratie in de batch-experimenten met aflopende ammoniumgehalten weer. Hierbij is te zien dat ammonium in alle zes verdunningen afneemt. Afhankelijk van de nitrietdosis daalt de ammoniumconcentratie met gemiddeld 90 mg N/l gedurende de duur van het experiment (30 dagen). Uit deze gegevens blijkt dat het Anammoxslib over het algemeen geen nadelige effecten ondervindt van het slibgistingswater. Er is wel een tendens te zien, dat bij lagere ammoniumconcentraties er meer ammonium wordt omgezet.

Tabel 4 geeft een overzicht van de nitriet- en ammoniumconsumptie in de batch-experimenten met aflopende nitrietconcentratie. In alle verdunningen neemt de nitrietconcentratie snel af, behalve daar waar na verloop van tijd geen ammonium meer aanwezig is. Hieruit blijkt duidelijk de koppeling tussen ammonium en nitriet in het Anammoxproces. Deze koppeling wordt nogmaals bevestigd door de resultaten van de batch-experimenten met verschillende nitrietconcentraties. Aan de oplossingen waaraan geen extern nitriet wordt toegevoegd, vindt geen afname van de ammoniumconcentratie plaats. De pH in alle monsters veranderde niet noemenswaardig. De hoogste pH-waarde bedroeg 8,6. Een analyse van de gasfase toonde stikstofgas als het eindproduct van de Anammoxreactie aan. Lachgasproductie (N_2O) werd in geen enkele batchproef waargenomen.

De omzettingssnelheden ($0,008 \text{ kg NH}_4^+-\text{N/kg DS per dag}$) en volumecapaciteiten ($0,01 \text{ kg NH}_4^+-\text{N/m}^3_{\text{reactor}}$ per dag) van de batchproeven zijn beduidend (factor 10) lager dan de waarden voor continu-systemen (Tabel 5 en 6). Deze lage waarden worden hoogst waarschijnlijk veroorzaakt door substraat-inhibitie. De concentraties ammonium en nitriet in de batchproeven zijn 10 tot 100 maal zo hoog als in de continu-proeven. Uit laboratoriumproeven is gebleken dat relatief lage nitrietconcentraties (60 mg N/l) reeds een remming van het Anammoxproces veroorzaken. Substraat-inhibitie door ammonium treedt pas bij zeer hoge ammoniumconcentraties op.

Tabel 3. Verwijdering van ammonium en nitriet uit slibgistingwater in de verdunningsserie met aflopende ammonium-concentraties.
Tijd in dagen, concentratie in mg N/l

Monster:	1		2		3		4		5		6	
Tijd	[NH ₄ ⁺]	[NO ₂]	[NH ₄ ⁺]	[NO ₂]	[NH ₄ ⁺]	[NO ₂]	[NH ₄ ⁺]	[NO ₂]	[NH ₄ ⁺]	[NO ₂]	[NH ₄ ⁺]	[NO ₂]
0	820	62	760	63	589	62	272	62	112	62	57	59
0,25	817	62	758	63	586	62	268	62	109	61	55	59
4	806	4	743	2	564	3	254	2	73	2	20	0
8	806	4	743	2	572	3	255	2	71	1	18	1
11	805	0	739	1	550	0	248	2	68	1	19	0
11,1	805	62	739	63	550	65	248	62	68	57	19	57
15	798	57	715	2	536	0	222	2	47	28	7	30
19	794	51	714	1	531	1	215	1	33	0	2	0
19,1	794	51	714	59	531	59	215	60	33	62	2	63
22	793	48	711	52	518	5	193	2	6	47	1	63
22,1	793	48	711	52	518	64	193	64	6	46	1	63
25	793	47	703	47	509	57	172	53	3	39	2	63
29	793	46	699	42	500	50	156	43	1	38	0	63
totaal omgezet	27	88	61	141	89	198	118	201	111	142	57	116

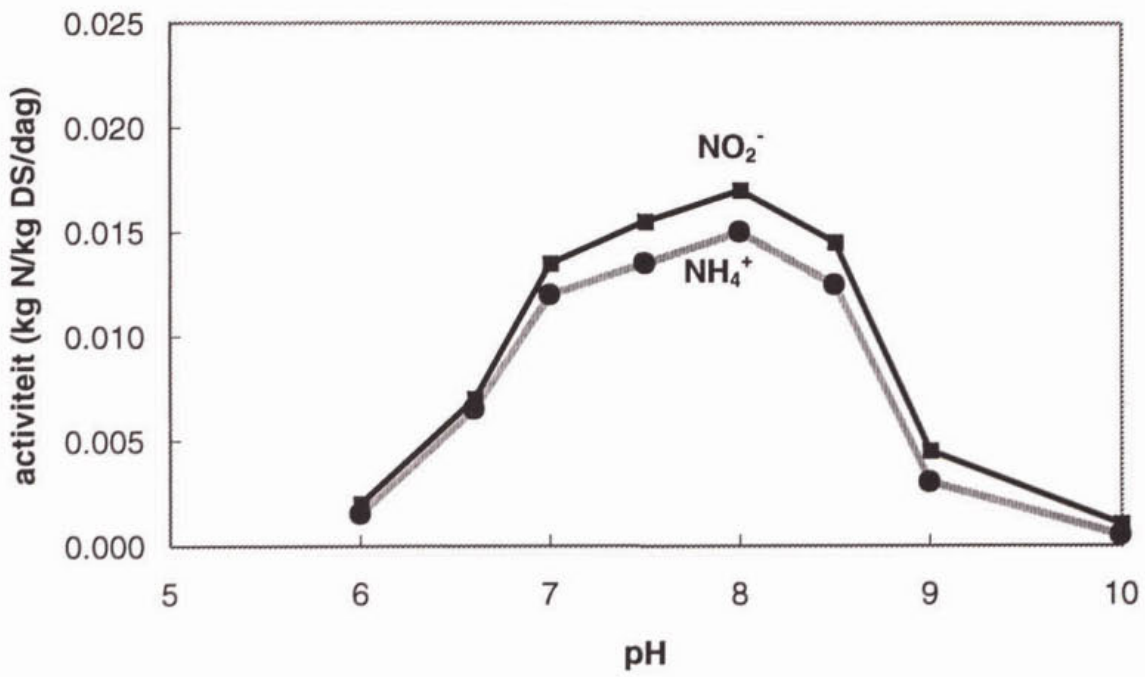
Tabel 4. Verwijdering van ammonium en nitriet uit slibgistingwater in de verdunningsserie met aflopende nitriet-concentraties.
Tijd in dagen, concentratie in mg N/l.

Monster:	1		2		3		4		5		6	
Tijd	[NH ₄ ⁺]	[NO ₂]	[NH ₄ ⁺]	[NO ₂]	[NH ₄ ⁺]	[NO ₂]	[NH ₄ ⁺]	[NO ₂]	[NH ₄ ⁺]	[NO ₂]	[NH ₄ ⁺]	[NO ₂]
0	122	123	117	99	116	71	115	46	114	26	123	0
0,25	119	120	114	96	113	67	113	44	113	25	123	0
4	115	86	100	19	91	4	91	2	103	1	122	0
8	88	16	87	2	84	1	88	1	98	1	119	0
11	82	16	84	2	81	1	82	1	95	1	118	0
11,1	82	127	84	108	81	70	82	47	95	26	118	0
15	49	54	45	2	44	2	56	1	81	1	115	0
19	33	44	32	1	37	2	53	1	78	1	114	0
19,1	33	126	32	119	37	75	53	47	78	28	114	0
22	29	116	31	103	2	35	16	44	72	26	113	0
25	18	78	17	87	1	28	0	4	45	0	113	0
29	13	58	2	54	0	28	0	1	44	0	113	0
totaal omgezet	109	258	115	269	116	165	115	137	70	82	10	0

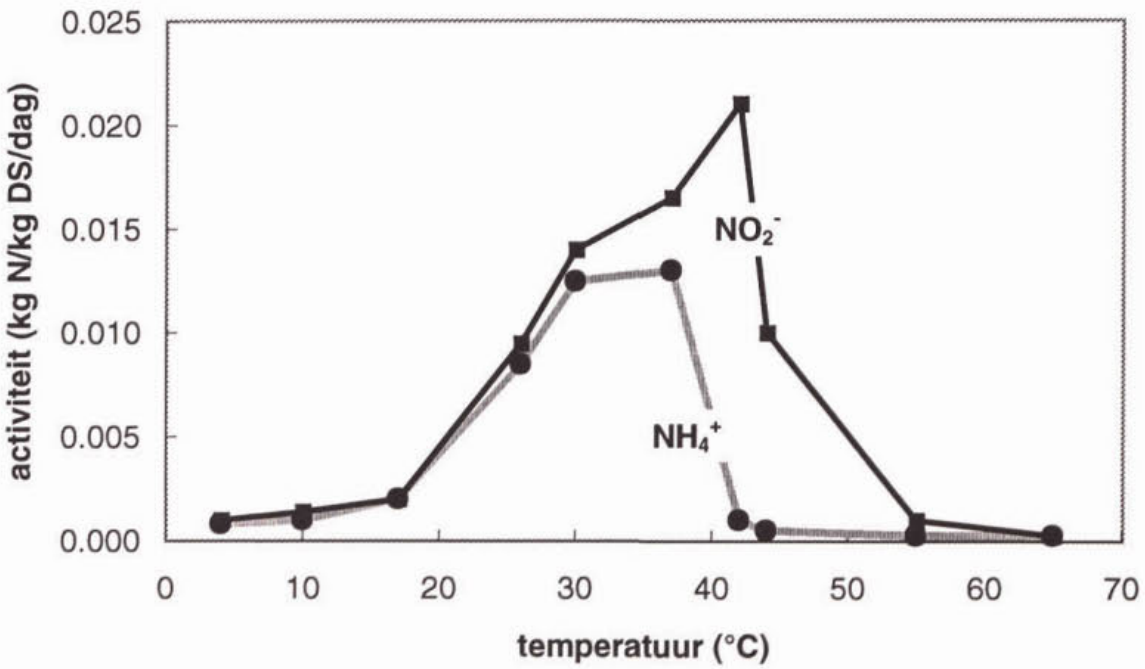
De resultaten van de pH- en temperatuurafhankelijke ammonium- en nitrietomzettingen zijn in figuren 4 en 5 samengevat. Uit figuur 4 valt af te leiden dat het Anammoxproces goed verloopt tussen een pH van 7 en 8,5. Onder pH 6 en boven pH 9 vindt geen omzetting van ammonium en nitriet meer plaats. De pH werd in alle omzettingsexperimenten meer basisch. Dit betekent dat het Anammoxproces OH^- maakt of H^+ verbruikt. Dit komt geheel overeen met het pH-verloop in de pilot-plantreactor. Hieraan moet zuur worden toegevoegd om de pH constant te houden.

Figuur 5 geeft de invloed van de temperatuur op de ammonium- en nitrietomzettingssnelheid weer. De ammoniumverwijdering met behulp van het Anammoxproces heeft een temperatuuroptimum tussen 30 en 37 °C. De nitrietomzetting verloopt optimaal tussen 30 en 45 °C. De ontkoppeling van de ammonium- en nitrietomzetting bij 42 en 45 °C is merkwaardig. Blijkbaar is er een endogene electronendonor beschikbaar voor nitrietomzetting bij hogere temperaturen (ammonium wordt namelijk bij die temperatuur niet verbruikt). Aangezien het temperatuuroptimum van het Anammoxproces boven 30 °C ligt, zal er in de praktijk aandacht besteed moeten worden aan eventuele temperatuurdalingen van het slibgistingwater. Aangezien het Anammoxproces zelf ook warmte produceert (zie tabel 9 en bijlage 2) zal een temperatuurdaling door transport (deels) worden gecompenseerd door opwarming door de Anammoxreactie.

De omzettingssnelheden en volumecapaciteiten in deze temperatuur- en pH-experimenten zijn ongeveer gelijk aan die van de verdunningreeksen met aflopende ammonium- en nitrietconcentraties. Dus beduidend lager dan in continuproeven. Ook hier treedt waarschijnlijk substraat-inhibitie op.



Figuur 4. Anammox-activiteit als functie van pH.

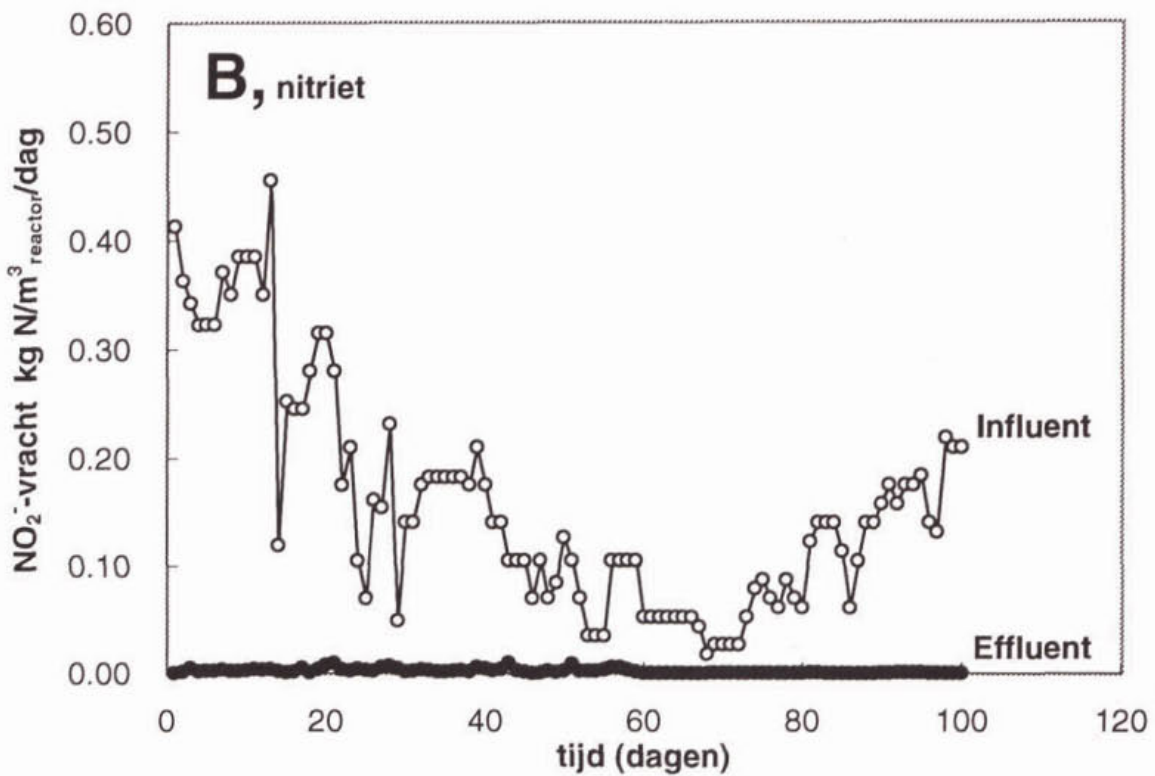
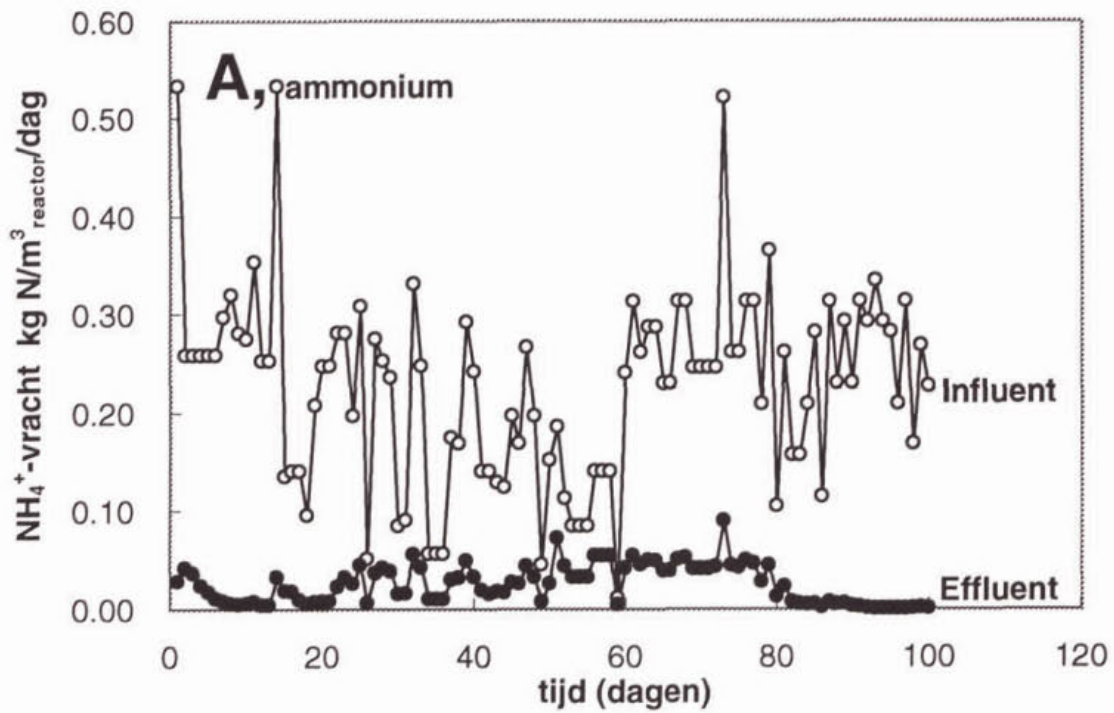


Figuur 5. Anammox-activiteit als functie van temperatuur.

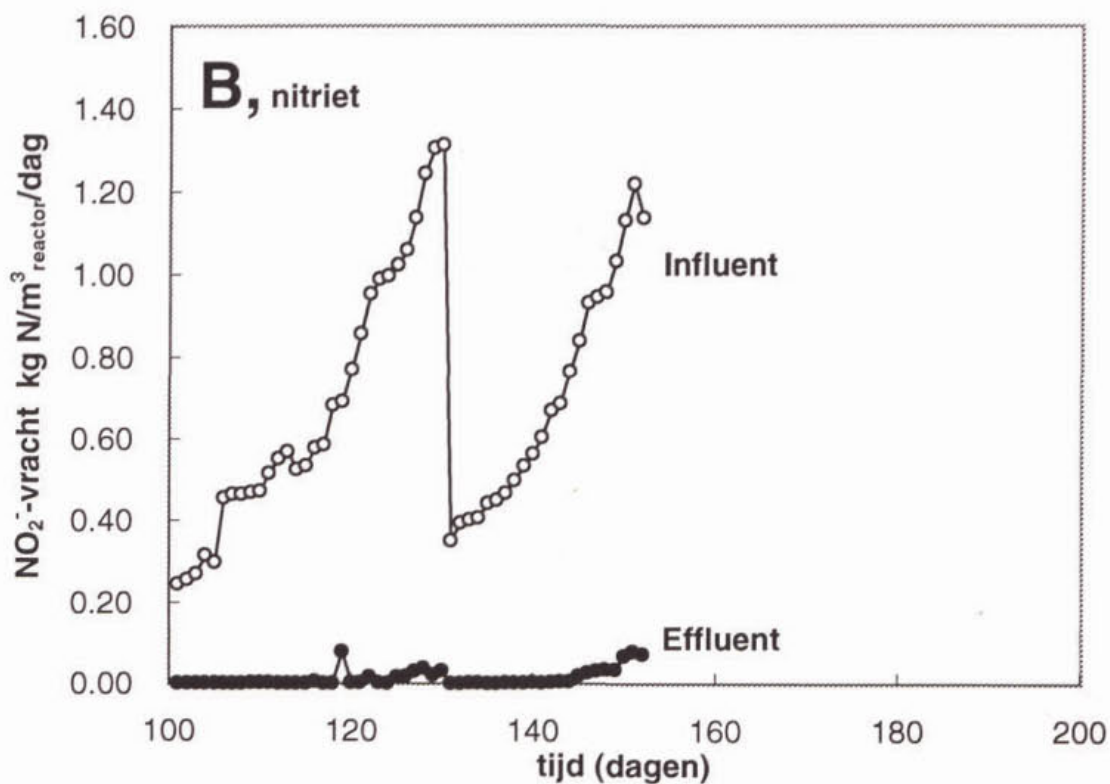
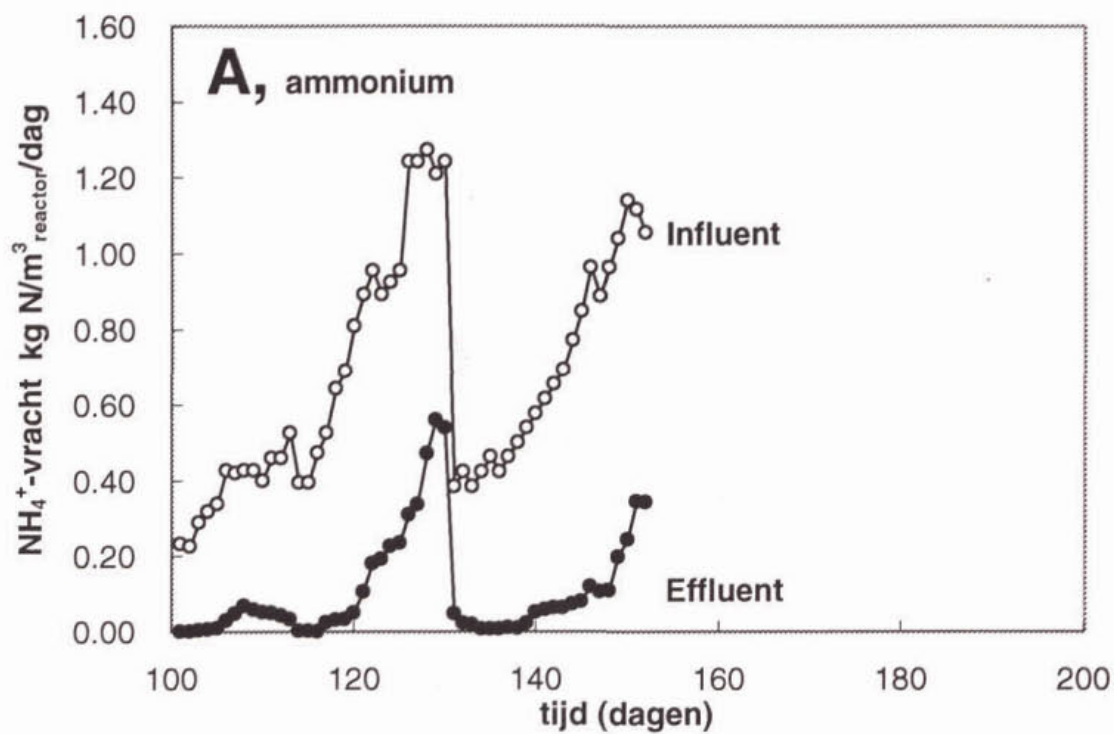
4.2 Fluïde-bedreactor

De verwijdering van ammonium uit slibgistingwater met behulp van het Anammoxproces werd onderzocht in een fluïde-bedreactor, die continu gevoed werd met slibgistingwater. In de figuren 6a,b en 7a,b zijn de resultaten weergegeven van de proef met de Anammox fluïde-bedreactor. Deze reactor werd gevoed met slibgistingwater uit Sluisjesdijk en een geconcentreerde nitrietoplossing. Aangezien gebruik werd gemaakt van verschillende "batches" slibgistingwater was de ammoniumconcentratie in het influent niet altijd hetzelfde. De ammonium:nitriet verhouding was gedurende de eerste zestig dagen 1:1,12. De gemiddelde totale N-vracht in die periode bedroeg $0,36 \text{ kg N}_{\text{tot}}/\text{m}^3_{\text{reactor}}$ per dag. Dit is in de zelfde orde van grootte als de waarde ($0,4 \text{ kg N}/\text{m}^3_{\text{reactor}}$ per dag) gevonden voor de Anammox pilot-plant van de TU Delft [Mulder *et al.*, 1995]. De gemiddelde gasproductie was 307 ml per dag. De toevoersnelheid van het slibgistingwater was gemiddeld 386 ml/dag, de toevoersnelheid van de nitrietoplossing 313 ml/dag. Dit resulteert in een totale toevoer van 699 ml/dag en een HRT van $(2250-1200-310)/699 = 1,06$ dagen.

Na 100 dagen werden de ammonium- en nitrietvracht zoveel mogelijk opgevoerd. Na 120 dagen werd een maximum van $2,6 \text{ kg N}_{\text{tot}}/\text{m}^3_{\text{reactor}}$ per dag bereikt. Omdat nog steeds met een nitrietlimitatie werd gewerkt, is dit nog geen maximale waarde. Experimenten met synthetisch afvalwater hebben aangetoond dat waarden van $5,1 \text{ kg N}_{\text{tot}}/\text{m}^3_{\text{reactor}}$ per dag gehaald kunnen worden [Van de Graaf *et al.* 1996]. Het opvoeren van de ammoniumvracht leidde echter tot een reductie van het ammoniumverwijderingspercentage van 98% tot 68 %. De effluentconcentratie was echter nooit meer dan 120 mg N/l. Na het gebruik van slibgistingwater met twee maal zo hoog ammoniumgehalte vanaf dag 60 waren er 20 dagen nodig om de effluentconcentratie van 380 naar 30 mg N/l terug te brengen. In deze periode steeg het ammoniumverwijderingspercentage van 60 naar bijna 100%. In tabel 5 zijn diverse parameters van de Anammox fluïde-bedreactor samengevat. De scherpe daling in figuur 7a,b werd veroorzaakt door een defecte pH regeling, waardoor de pH van de reactor 10 uur ongeveer 4,5 was. Het duurde ongeveer 20 dagen voordat de activiteit weer helemaal hersteld was.



Figuur 6A, B: Verwijdering van ammonium (boven, A) uit slibgistingwater in een fluïde-bedreactor beënt met Anammoxslib, met behulp van een synthetische nitrietoplossing. Eerste 100 dagen. In figuur 6B (onder) is de nitrietbelasting weergegeven.



Figuur 7A, B: Verwijdering van ammonium uit slibgistingwater in een fluïde-bedreactor beënt met Anammoxslib, met behulp van een synthetische nitrietoplossing. Laatste 50 dagen. In figuur 7B (onder) is de nitrietbelasting weergegeven.

Tabel 5. Overzicht van de parameters van de Anammox fluïde-bedreactor.

	dag 1-100	dag 100-150	
NH ₄ ⁺ -N influent	1502 ± 454	1407 ± 108	mg N/l
NO ₂ ⁻ -N influent	975 ± 505	277 ± 22	mg N/l
NH ₄ ⁺ -N effluent	180 ± 115	27 ± 85	mg N/l
NO ₂ ⁻ -N effluent	6 ± 6	3 ± 3	mg N/l
rendement NH ₄ ⁺ -N verwijdering	72 ± 18	88 ± 9	%
rendement NO ₂ ⁻ -N verwijdering	98 ± 2	99 ± 2	%
Ammoniumvrucht	0,10 - 0,34	0,24 - 1,34	kg NH ₄ ⁺ -N/m ³ _{reactor} .dag
Nitrietvrucht	0,10 - 0,40	0,22 - 1,29	kg NO ₂ ⁻ -N/m ³ _{reactor} .dag
Stikstofvrucht	0,20 - 0,74	0,48 - 2,63	kg N _{tot} /m ³ _{reactor} .dag
Omzettingcapaciteit	0,02 - 0,07	0,05 - 0,26	kg N _{tot} /kg DS.dag

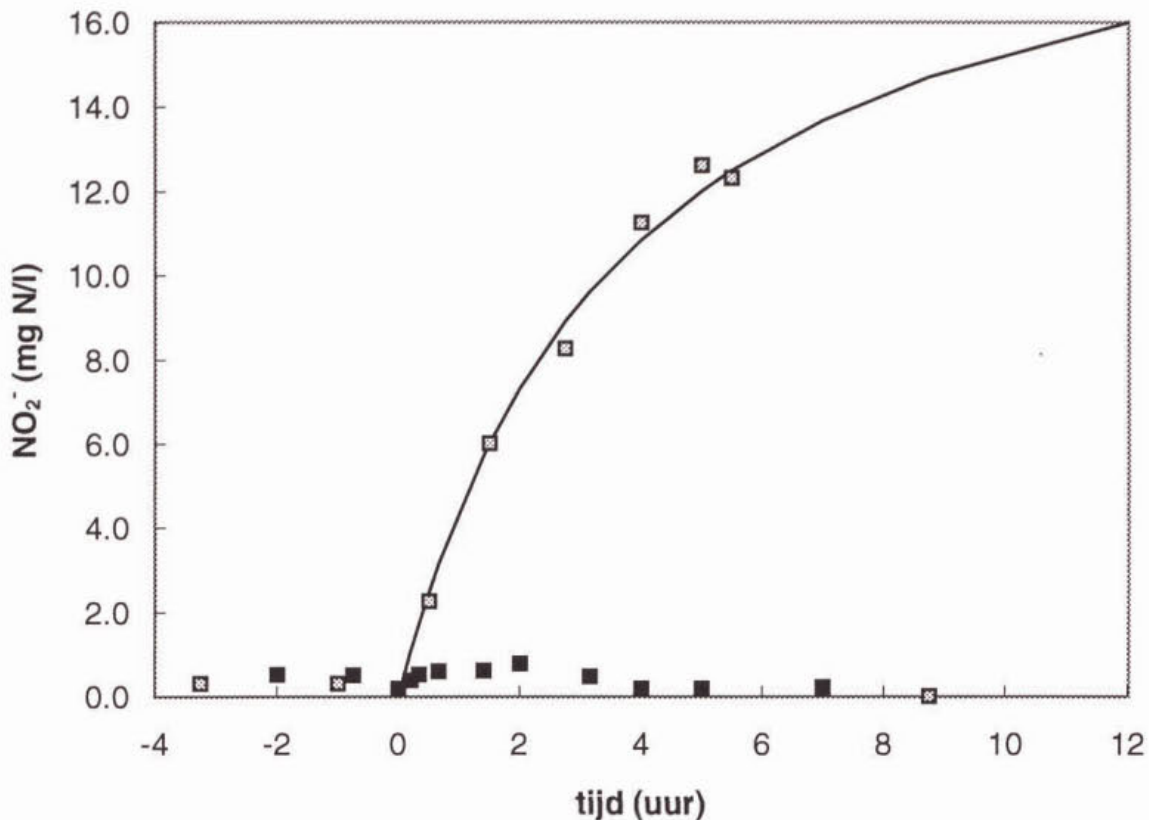
4.3 Sequencing-batchreactor

Direct na de start van de sequencing-batchreactoren (SBR's) hoopten zich in beide SBR's ammonium en nitriet op aan het begin van iedere cyclus. De nitrietconcentratie in SBR2 steeg van 0,7 mg N/l tot 8,4 mg N/l, de ammoniumconcentratie van 14 mg N/l naar 16,8 mg N/l. Na 4 uur nam zowel de ammonium- als de nitrietconcentratie snel af, die constant bleven gedurende de rest van de cyclus. Het Anammoxslib was blijkbaar niet actief gedurende de eerste 4 uur na het leegpompen van de reactor. Deze inactivatie bleek veroorzaakt te worden door het aanzuigen van lucht tijdens het leegpompen van de SBR, waardoor de SBR tijdelijk niet meer anaëroob was. Er werden maatregelen genomen om dit te voorkomen: in SBR1 werd de headspace intensiever begast tijdens het leegpompen van de reactor, SBR2 werd gasdicht gemaakt en er werd een gasbufferfles toegevoegd. Deze maatregelen waren succesvol; de ophoping van ammonium en nitriet na het leegpompen was veel minder groot, hoewel het nog wel kon worden waargenomen (zie fig. 8 en 9a,b,c).

Gedurende drie maanden werd ammonium voor 82% (SBR1) en 80% (SBR2), en nitriet voor 99,2% (SBR1) en 99,4% (SBR2) uit het slibgistingswater verwijderd. Er werd 1,03 (SBR1) respectievelijk 1,5 (SBR2) mol NO_2^- per mol NH_4^+ verwijderd. Er werd 0,2 mol NO_3^- (SBR 1 en 2) per verwijderde mol NH_4^+ geproduceerd. De omzettingcapaciteit van de SBR's was $0,045 \text{ kg N}_{\text{tot}}/\text{m}^3_{\text{reactor}}$ per dag. Deze capaciteit is relatief laag vergeleken met de capaciteit van de fluïde-bedreactor. Echter de SBR's bevatten slecht 0,5 g DS/l, terwijl de fluïde-bedreactor ongeveer 10 g DS/l bevatte. In tabel 6 zijn de activiteiten van de SBR's en fluïde-bedreactor samengevat.

Tabel 6 Vergelijking van de SBR's met fluïde-bedreactor

	Activiteit $\text{kg NH}_4^+-\text{N}/\text{m}^3_{\text{reactor}}$ per dag	Activiteit $\text{kg NH}_4^+-\text{N}/\text{kg DS}$ per dag	Hoeveelheid slib ($\text{kg DS}/\text{m}^3$)
FBR	0,34-1,2	0,04-0,12	10
SBR1	0,045	0,09	0,5
SBR2	0,051	0,17	0,3



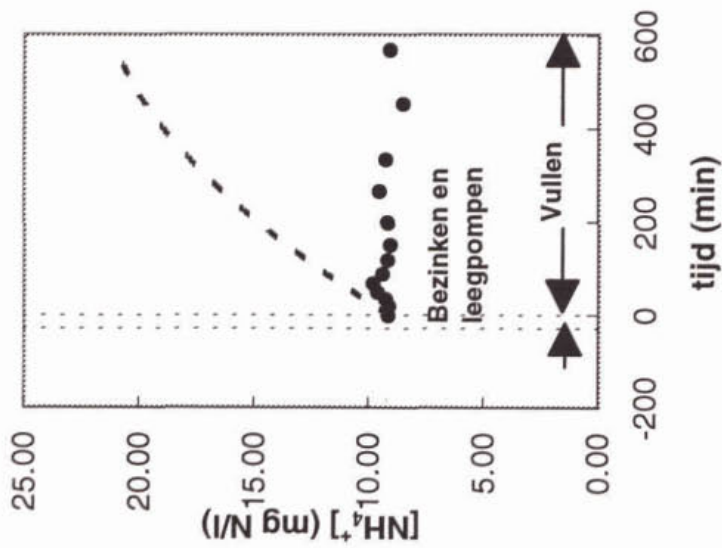
Figuur 8: Verloop van de nitrietconcentratie in een SBR gevoed met slibgistingwater, voordat (grijze vierkanten) en nadat (zwarte vierkanten) maatregelen waren genomen om de instroom van lucht tijdens het afpompen van de reactor te voorkomen. De lijn geeft aan hoe de nitrietconcentratie zou verlopen als het Anammoxproces niet zou verlopen.

De bedrijfsvoering van de SBR's verliep probleemloos; op laboratoriumschaal kostte dit systeem minder onderhoud dan de fluïdebedreactoren.

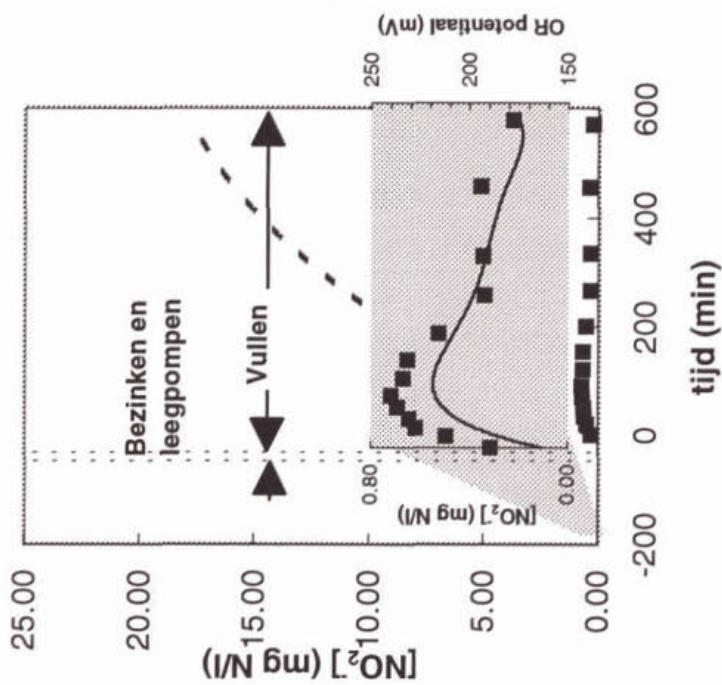
De slibproductie in SBR2 is gemeten door de hoeveelheid slib in het effluent te bepalen. Er bleek $0,022 \pm 0,006$ kg slib/kg omgezette stikstof geproduceerd te worden. Dit is weinig vergeleken met een denitrificatieproces waarin ongeveer 1 kg slib/kg NO₃⁻ wordt geproduceerd.

De bezinkbaarheid van het Anammoxslib is onderzocht door de bezinksnelheid van het slib in de SBR's na drie maanden te meten (zie tabel 7). Het slib in de SBR's kon worden verdeeld in drie categorieën: (1) Het **entmateriaal** (uit de Anammox pilot-plant) dat uit korrels met een hoge dichtheid bestond; (2) **Nieuwe vlokken** die in de SBR's waren gegroeid met een wat lossere structuur; (3) **Gruis** dat bestond uit door de roerder vergruisde nieuwe vlokken.

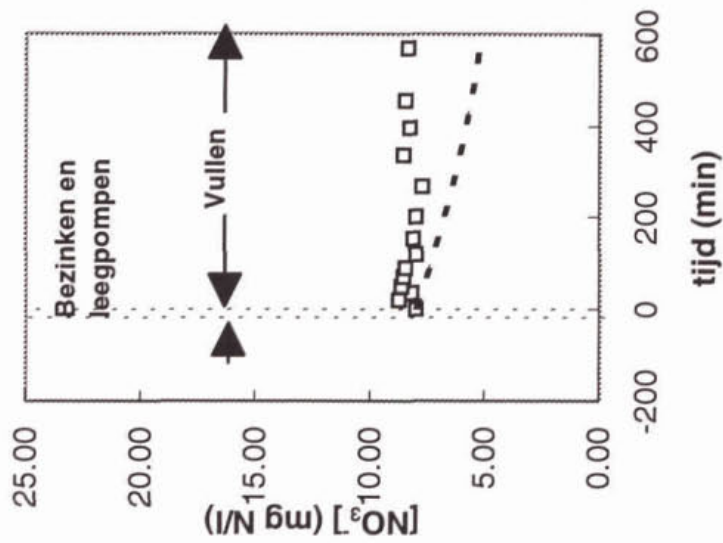
Ammonium



Nitriet



Nitraat



Figuur 9A, B, C: Concentraties van ammonium, nitriet en nitraat gedurende een SBR cyclus, nadat aanzuigen van lucht was voorkomen. De onderbroken lijnen geven het concentratieverloop aan als er geen microbiologische omzettingen zouden plaatsvinden, de cirkels en vierkanten de gemeten waarden. In het grijze gebied in de middelste figuur is het verloop van de nitrietconcentratie op een andere schaal (0-80 mg N/l) te volgen. In dit grijze gebied is te zien dat het verloop van de redoxpotentiaal (aangegeven door de onderbroken lijn) overeenkomt met het verloop van de nitrietconcentratie (vierkanten). Het moment waarop de nitrietconcentratie maximaal is (0.8 mg/l na 80 minuten) valt samen met het maximum van de redoxpotentiaal (+220 mV)

Het slibgistingwater had een positieve invloed op de bezinkbaarheid: in SBR1 bezonken alle drie de categorieën Anammoxslib. In SBR2 die gevoed werd met synthetisch slibgistingwater bezonk het gruis niet (tabel 7). In deze reactor was de slibretentie minder goed. Ook nadat de pomp voor het leegpompen van de reactor was vervangen door een snellere pomp, en er dus in deze SBR strenger geselecteerd werd op bezinkbaarheid, bleef de bezinkbaarheid minder goed. Voor het nieuw gegroeide Anammoxslib bleef het moeilijker om zich in de reactor te handhaven. Het Anammoxslib in SBR2 groeide daarom op de wand van de reactor, op de roerder en op het goed bezinkbare entmateriaal.

Tabel 7. Bezinkbaarheid van het Anammoxslib uit de sequencing batchreactoren.

	SBR1	SBR2	
Entmateriaal	21,6-43,2	39,6-90	meter/uur
Nieuwe vlokken	4,3-14,4	3,2-6,5	meter/uur
Gruis	0-4,3	0-0,7	meter/uur

De redoxpotentiaal in SBR2 is continu gemeten. Onder de experimentele omstandigheden waarbij deze SBR werd bedreven, dit wil zeggen bij lage nitrietconcentraties, bleek de redoxpotentiaal bepaald te worden door de nitrietconcentratie. Ophoping van nitriet werd waargenomen als een stijging in de redoxpotentiaal (figuur 9b). De redoxpotentiaal kan daarom dienen als een eenvoudige en geschikte manier om het Anammoxproces te bewaken.

5 Evaluatie

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de betekenis van de resultaten van dit onderzoek voor het in de praktijk brengen van het Anammoxproces voor de behandeling van slibgistingswater. In **tabel 8** worden de waarden van belangrijke parameters zoals die gevonden zijn voor het Anammoxproces vergeleken met die van nitrificatie in een actief-slib systeem en nitrificatie in een gasliftreactor. **Tabel 9** geeft aan hoe het Anammoxproces gedimensioneerd zou worden voor de slibgistingswaterstroom uit de slibverwerking van Sluisjesdijk.

Bij de dimensionering van het Anammoxproces in tabel 9 is geen rekening gehouden met de problemen die bij opschaling komen kijken.

De volgende vier punten zijn van bijzonder belang voor het toepassen van het Anammoxproces:

- (A) Het Anammoxproces heeft een **nitriet- of nitraatbron** nodig. In een vroeg stadium van het onderzoek is gekozen voor nitriet als electronacceptor omdat bleek dat de activiteit van het Anammoxproces veel hoger is met nitriet. Onderzoek van de vakgroep Bioprocestechnologie van de Technische Universiteit Delft naar de omzetting van slibgistingswater met een reactor zonder slibretentie (het zogenaamde SHARON-proces) heeft aangetoond dat het haalbaar en goedkoop is om biologisch nitriet te produceren [Brouwer 1995]. Een biologische nitrietproductie heeft twee voordelen ten opzichte van het gebruik van een synthetische nitrietvoorziening: (1) er hoeft geen nitriet te worden gekocht, en (2) als eerst de helft van het ammonium uit het slibgistingswater omgezet wordt in nitriet is de belasting voor de Anammoxreactor al gehalveerd en kan volstaan worden met een kleiner reactorvolume, wat een kostenbesparing met zich meebrengt.

- (B) Hoewel de lage slibproductie van het Anammoxproces uiteindelijk een groot voordeel is, is het ook de oorzaak van een waarschijnlijk langzame **opstart**. Op dit moment is er weinig inzicht in de processen die een rol spelen bij de opstart van dit soort systemen. Ervaringen met de opstart van andere anaërobe *high-rate* reactoren wijzen erop dat een langzame opstart onvermijdelijk is, mede omdat het te snel opvoeren van de belasting leidt

Tabel 8: Prestaties van het Anammoxproces in een fluïde-bedreactor vergeleken met aërobe nitrificatie naar nitriet (of nitraat) in een actief-slibstelsysteem en in een gasliftreactor. De herkomst van de getalwaarden is - voorzover er niet wordt verwezen - terug te vinden in Bijlage 1.

Parameter (eenheid)	Anammox fluïde- bedreactor	(ultra)laag belaste actief-slibreactor	gaslift- reactor
omzettingssnelheid van slib (kg NH ₄ ⁺ -N/kg DS per dag)	0,02-0,13	0,012 ¹	0,25-1 ²
omzettingssnelheid in reactor (kg NH ₄ ⁺ -N/m ³ per dag)	0,24-1,34	0,05-0.5 ¹	5 ²
zuurverbruik (kg H ₂ SO ₄ /kg NH ₄ ⁺ -N)	0,09 ³	0	0
loogverbruik (kg NaOH/kg NH ₄ ⁺ -N)	0 (1,1 ^{3,4})	3,8 ^{5,6}	3,8 ^{5,6}
zuurstofconsumptie (kg O ₂ /kg NH ₄ ⁺ -N)	0 (1,9 ⁴)	3,4 ⁵ ;(4,5 ⁶)	3,4 ⁵ ;(4,5 ⁶)
benodigde CZV (kg CZV/kg NH ₄ ⁺ -N)	0	0 (>1,7 ⁵ ;2,9 ⁶)	0 (>1,7 ⁵ ;2,9 ⁶)
slibproductie (kg DS/kg NH ₄ ⁺)	0,17	0,12 (0,8 ⁵ ;1,3 ⁶)	0,12 (0,8 ⁵ ;1,3 ⁶)
slibindex	-	100-200 ⁷	-
slibbezinksnelheid (m/uur)	20-40	1 ⁷	50-100 ²

¹) [U. Wiesman, 1994] ²) [Van Benthum et al., 1996] ³) De buffercapaciteit van het slibgistingwater is in beschouwing genomen ⁴) De helft van de te behandelen ammonium wordt eerst genitrificeerd naar nitriet

⁵) Het gevormde nitriet of ⁶) het gevormde nitraat wordt gedenitrificeerd naar stikstofgas. ⁷) [L. Tijhuis, 1995]

Tabel 9: Dimensionering van het Anammoxproces in een fluïde-bedreactor voor de behandeling van het slibgistingwater van Sluisjesdijk (500 kg $\text{NH}_4^+\text{-N}$ per dag in 500 tot 1000 m^3) De herkomst van de getalwaarden is - voorzover er niet wordt verwezen - terug te vinden in Bijlage 1 en 2. De getallen tussen haakjes geven de waarden¹ aan als eerst een gedeelte van het ammonium wordt genitrificeerd naar NO_2^- .

Parameter	per kg te behandelen $\text{NH}_4^+\text{-N}$ per dag	per 500 kg te behandelen $\text{NH}_4^+\text{-N}$ per dag
benodigde hoeveelheid Anammoxslib (kg DS)	10 - 25(4,5-11,5)	5000 - 12500 (2200 -6000)
soortelijke massa slibdeeltje (kg natgewicht/ m^3 slib)	1000 - 1700	idem
slib-dichtheid (kg DS/ m^3)	10	idem
slib bezinksnelheid (m/uur)	20 - 40	idem
diameter slibdeeltje (mm)	1 - 2	idem
slibproductie (kg DS/dag) ²	0,17 (0,07)	85 (39)
benodigd volume fluïde-bedreactor (m^3)	1 - 2,5(0,45 - 1,1)	500 - 1250 (220 - 550)
benodigde superficiële vloeistofsnelheid (m/uur)	0,4 - 6,5	idem
effectief vermogen benodigd voor de fluïdisering van het bed (kW)	$1 \cdot 10^4$ - $40 \cdot 10^4$ ($0,45 \cdot 10^4$ - $20 \cdot 10^4$)	$5 \cdot 10^6$ - $200 \cdot 10^6$ ($2 \cdot 10^6$ - $90 \cdot 10^6$)
effectiviteit slibretentie (%/dag)	98,3 - 99,7 %	idem
gasproductie (m^3 /dag)	1,5 (0,70)	770 (350)
vloeistof-verblijftijd (dagen)	0,5 - 4	
zuurverbruik (kg H_2SO_4)	0,09	50
loogverbruik (kg NaOH) ²	1,9	950
warmteproductie (kJ/dag)	20000 (18000)	$1 \cdot 10^7$ ($0,9 \cdot 10^7$)
temperatuurstijging slibgistingwater ($^\circ\text{C}$)	2,5 - 5 (2,2 - 4,3)	
recycleverhouding	onbelangrijk in het ontwerp, afhankelijk van NH_4^+ -belasting en benodigde superficiële vloeistofsnelheid	

¹) Er wordt dan eerst 1,2/2,2 gedeelte van het ammonium genitrificeerd. De meeste parameters zijn dan 1/2,2 gedeelte van hun waarde zonder nitrificatie. Zie bijlage 1. ²) Als eerst een gedeelte van de ammonium wordt omgezet naar nitriet, is er loog nodig. Als kan worden volstaan met een rendement van 70%, hoeft er in het geheel geen loog te worden gebruikt, omdat de buffercapaciteit van het slibgistingwater dan voldoende is.

tot desintegratie - en uiteindelijk verlies - van het entmateriaal [Lettinga et al. 1980]. Daarom is het reëel voor de opstartfase van het eerste full-scale Anammoxproces uit te gaan van een periode van een jaar. Dit probleem is eenmalig. Als het Anammoxproces eenmaal is op grotere schaal opgestart is, is er altijd voldoende entmateriaal beschikbaar om nieuwe installaties snel op te starten.

- (C) In dit haalbaarheidsonderzoek zijn twee **reactortypen** onderzocht: de sequencing batch-reactor (SBR) en de fluïde-bedreactor. Welk reactortype is het meest geschikt om het Anammoxproces in op te schalen? In de SBR werd een 3,4 maal hogere activiteit bereikt dan in de fluïde-bedreactor. Verder was de SBR op laboratoriumschaal minder onderhoudsintensief dan de fluïde-bedreactor. Daar staat tegenover dat de slibgranules die in een fluïde-bedreactor groeien breed inzetbaar zijn (in ieder reactor-type te gebruiken) en de vlokken die in een SBR groeien alleen te gebruiken zijn in een SBR. Verder bieden de slibgranules uit de fluïde-bedreactor een betere bescherming aan de micro-organismen verantwoordelijk voor het Anammoxproces omdat deze granules massatransport-gelimiteerd zijn. Als er in de Anammoxreactor toxische of inhiberende concentraties van een of andere component (zoals het substraat nitriet) optreden zijn de Anammox-micro-organismen in de granules beschermd, waar de micro-organismen in de vlokken dat niet zijn.
- Er zijn ook andere reactortypes denkbaar. Bij een hoge reactorbelasting is het denkbaar dat de menging kan worden bewerkstelligd door de eigen gasproductie.
- (D) Voor het monitoren van het Anammoxproces zijn in dit haalbaarheidsonderzoek goede ervaringen opgedaan met het gebruik van een redoxelectrode.

6 CONCLUSIES EN TOEKOMSTIG ONDERZOEK

Uit de batch-experimenten is duidelijk gebleken dat het Anammoxproces **geen** nadelig effecten ondervindt van het slibgistingwater met weinig zwevend stof en dat het Anammoxproces in staat is ammonium en nitriet uit slibgistingwater te verwijderen. De optimale pH (7-8,5) en temperatuur (30-37°C) voor het Anammoxproces liggen ruim binnen de waarden die gebruikelijk zijn voor slibgistingwater uit de praktijk.

De experimenten met de fluïde-bedreactor hebben laten zien dat het Anammoxproces 150 dagen lang in staat is ammonium voor $88 \pm 9\%$ en nitriet voor $99 \pm 2\%$ uit het slibgistingwater te verwijderen. Bij stabiel bedrijf kon de stikstofbelasting van $0,2 \text{ kg N/m}^3$ per dag worden opgevoerd naar $2,6 \text{ kg N}_{\text{tot}}/\text{m}^3_{\text{reactor}}$ per dag. Met synthetisch afvalwater werd een maximum bereikt van $5,1 \text{ kg N}_{\text{tot}}/\text{m}^3_{\text{reactor}}$ per dag.

Het Anammoxproces werkt naar tevredenheid in een sequencing batch reactor (SBR). Het slibgistingwater heeft een goede invloed op de bezinkbaarheid van het Anammoxslib in de SBR's. Het meten van de redoxpotentiaal is een eenvoudige manier om het Anammoxproces te monitoren en controleren. De micro-organismen verantwoordelijk voor het Anammoxproces tolereren zuurstof maar er wordt onder die condities geen ammonium geoxideerd.

Aanbevelingen

Op korte termijn

- Onderzoek naar de combinatie van het Anammox-proces met het SHARON-proces als stabiele nitriet-voorziening. Hierin aandacht voor de invloed van zwevend stof, de maximale omzettingcapaciteit, de regeling en kosten van zo'n gecombineerd proces.
- Opschalen van het Anammoxproces naar middelgroot pilot-plantniveau (2-4 m³).

Op langere termijn

- Onderzoek naar de mogelijkheden van het combineren van nitrificatie naar nitriet (onder zuurstofgelimiteerde condities) en het Anammoxproces in een enkele reactor.
- Het toepassen van het Anammoxproces op afvalstromen met lage ammoniumconcentraties.

7 LITERATUUR

- Broda E (1977) Two kinds of lithotrophs missing in nature. *Z. F. Allgem. Mikrobiol.* 17:491-493
- Brouwer M (1995) Biologische stikstofverwijdering op Sluisjesdijk met het SHARON-proces. BODL thesis TU Delft.
- Cataldo DA, Haroon M, Schrader LE & Youngs VL (1975) Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic acid. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 6, 71-80.
- Fawcett JK & Scott JE (1960) A rapid and precise method for determination of urea. *J. Clin. Path.* 13, 156-159.
- Griess-Romijn-Van Eck (1966) Physiological and chemical tests for drinking water. NEN 1056, IV-2. Nederlands Normalisatie Instituut Delft.
- Heijnen JJ (1991) Bioenergetics and biokinetics of microbial growth and product formation - Lecture notes, TU Delft, Delft.
- Jetten MSM, Logemann S, Muyzer G, de Vries S, van Loosdrecht MCM, Robertson LA & Kuenen JG (1996) Novel principles in the microbial conversion of nitrogen compounds. *Anthonie van Leeuwenhoek Beijerinck centennial special issue* (in press)
- Jetten MSM, Robertson LA & Kuenen JG (1996) Recent advances in the removal of nitrogen from waste water. IN: *Proceedings of the 7th ISME-meeting* (Tiedje JA, ed.), ASM Press Washington (in press).
- Lettinga G, van velsen A, Hobma S, de Zeeuw G & Klapwijk A (1980) Use of the upflow sludge blanket reactor concept for biological waste treatment. *Biotechnol. Bioeng.* 22, 699-734.
- Mulder A, van de Graaf AA, Robertson LA & Kuenen JG (1995) Anaerobic ammonium oxidation discovered in a denitrifying fluidized bed reactor. *FEMS Microbiol Lett.* 16, 177-184.
- Smith JM, Stammers E, Janssen LPBM (1981) *Fysische transport verschijnselen 1*, DUM, Delft.
- Tijhuis L (1995) The biofilm airlift suspension reactor. *Proefschrift Technische Universiteit Delft.*
- van Benthem WAJ, Garrido-Fernandez JM, Tijhuis L, van Loosdrecht MCM & Heijnen JJ (1996) Formation and detachment of biofilms and granules in a nitrifying biofilm airlift suspension reactor, *Biotechnol progress*, in progress.
- Van de Graaf AA, Mulder A, de Bruijn P, Jetten MSM, Robertson LA & Kuenen JG (1995) Anaerobic ammonium oxidation is a biological mediated process. *Appl. Environ. Microbiol.* 61, 1246-1251
- Van de Graaf AA, de Bruijn P, Robertson LA, Jetten MSM & Kuenen JG (1996) Autotrophic growth of anaerobic, ammonium-oxidising bacteria in a fluidized bed reactor. *Microbiology (UK)* in press
- Wiesmann U (1994) Biological nitrogen removal from wastewater. *Advances in biochemical engineering - Biotechnology* 51, 113-153

Bijlage 1: Herkomst van de getalwaarden uit tabel 8

omzettingssnelheid van het slib (Anammox)

is te berekenen door *omzettingssnelheid van de reactor* te vermenigvuldigen met het volume van de reactor V_{reactor} (0,002 m³) en te delen door de hoeveelheid slib in de reactor (0,02 kg DS).

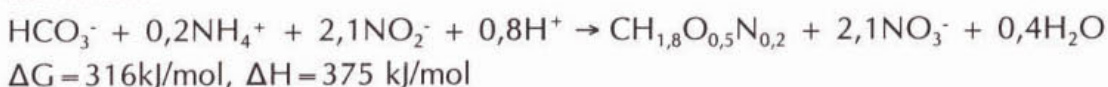
omzettingssnelheid van de reactor (Anammox)

volgt uit tabel 5, waarin de resultaten van de Anammox fluïde-bedreactor zijn weergegeven. De ammoniumvrucht varieerde tussen 0,3 en 1,3 kg NH₄⁺-N/m³ per dag. Het verwijderingsrendement was steeds ongeveer 80%.

zuurverbruik (Anammox)

voor Anammox gelden de volgende reactievergelijkingen:

assimilatie:



dissimilatie:



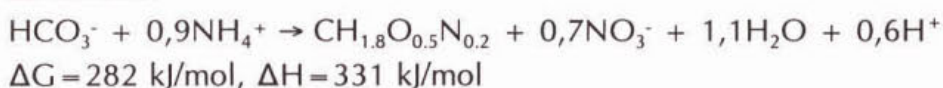
De energiedissipatie voor autotrofe groei *met reversed electron transport* is volgens Heijnen [1991] 3500 kJ/C-mol. Om dit op te brengen moet de dissimilatiereactie 10,6 keer plaatsvinden voor iedere assimilatiereactie. Dus wordt er 0,074 mol H⁺ geconsumeerd voor iedere mol ammonium. Dus zou onder ongebufferde condities 0,26 kg H₂SO₄/kg NH₄⁺-N moeten worden toegevoegd.

De buffercapaciteit van het glibgistingwater wordt als volgt berekend: er is (bij pH 7,7-8,2) 0,94 mol HCO₃⁻/mol NH₄⁺ aanwezig. De buffercapaciteit van de bicarbonaatbuffer is tussen pH 8 en 8,5 0,05 mol H⁺/mol buffer (kan met dissociatieconstanten worden berekend). Dus 0,047 mol H⁺ wordt op deze manier opgevangen. In de praktijk hoeft er dus slechts 0,09 kg H₂SO₄/kg NH₄⁺-N te worden toegevoegd.

loogverbruik (nitrificatie)

voor nitrificatie gelden de volgende reactievergelijkingen:

assimilatie:



dissimilatie:



De energiedissipatie voor autotrofe groei met *reversed electron transport* is volgens Heijnen [1994] 3500 kJ/C-mol. Om dit op te brengen moet de dissimilatiereactie 13,8 keer plaatsvinden voor iedere assimilatiereactie. Dus wordt er 2 mol H⁺ geproduceerd voor iedere mol ammonium. Dan zou onder ongebufferde condities 5,8 kg NaOH/kg NH₄⁺-N moeten worden toegevoegd. De buffercapaciteit van het glibgistingwater wordt als volgt berekend: er is (bij pH 7,7-8,2) 0,94 mol HCO₃⁻/mol NH₄⁺ aanwezig. De buffercapaciteit van de bicarbonaatbuffer is tussen pH 8 en 6 0,675 mol H⁺/mol buffer (kan met dissociatieconstanten worden berekend). Dus 0,635 mol H⁺ wordt op deze manier opgevangen. In de praktijk moet dus 3,8 kg NaOH/kg NH₄⁺-N te worden toegevoegd. Voor de combinatie nitrificatie/ Anammox is slechts 1,9 kg NaOH/kg NH₄⁺-N nodig omdat dan 1,2/2,2 gedeelte van het ammonium genitrificeerd hoeft te worden.

zuurstofconsumptie

De zuurstofconsumptie benodigd voor nitrificatie kan eenvoudig uit bovenstaande reactievergelijkingen worden berekend. Voor nitrificatie/Anammox geldt dat de zuurstofconsumptie 1,2/2,2 van de voor totale nitrificatie benodigde zuurstofconsumptie is.

benodigde CZV (nitrificatie/denitrificatie)

Voor denitrificatie van nitriet naar stikstofgas zijn 3 electronen nodig. 1 mol CZV doneert 4 electronen. Dus (3/4)·(32/14) kg CZV/kg NH₄⁺-N.

slibproductie

De slibproductie kan eenvoudig uit bovenstaande reactievergelijkingen worden berekend. De slibproductie van denitrificatie is 0,4 kg DS/kg CZV [Wiesmann, 1994]. Dus de slibproductie is 0,4·(32/14)·(3/4) kg CZV/kg NH₄⁺-N.

slibbezinksnelheid (Anammox). Experimenteel bepaald (tabel 7).

Bijlage 2: Herkomst van de getalwaarden uit tabel 9

benodigde hoeveelheid slib

Berekend uit de omzettingssnelheid van het slib (tabel 8). Benodigde hoeveelheid slib = NH_4^+ -vracht/omzettingssnelheid van het slib.

soortelijke van het massa slibdeeltje (kg natgewicht/m³)

Kan berekend worden uit de slib-bezinksnelheid (v_s) via de wet van Navier-Stokes [Smith et al. 1981]. Een krachtenbalans over een slibdeeltje levert dan :

$$\left(\frac{\pi}{6}\right) \cdot d^3 \cdot (\rho_{\text{deeltje}} - \rho) \cdot g = C_w \cdot \left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot d^2 \cdot \frac{1}{2} \rho v_s^2$$

d (diameter slibdeeltje), ρ (soortelijke massa water),

ρ_{deeltje} (soortelijke massa van het deeltje), g (versnelling van de zwaartekracht),

C_w (wrijvingscoëfficiënt = 2 - 8 bij deze bezinksnelheid)

slib-dichtheid, slib-bezinksnelheid, diameter van het slibdeeltje

Experimenteel gevonden.

slibproductie

Uitgerekend door de in tabel 8 berekende slibproductie te vermenigvuldigen met de NH_4^+ -N vracht.

benodigd volume van de fluïde-bedreactor

Berekend uit omzettingssnelheid van de reactor. Het benodigde reactorvolume = NH_4^+ -vracht/omzettingssnelheid van de reactor.

benodigde superficiële vloeistofsnelheid

De superficiële vloeistofsnelheid v_0 waarbij het bed wordt opgetild kan berekend worden via de vergelijking van Bernouilli [Smith et al. 1981]. Voor een fluïde bed levert deze vergelijking de volgende relatie:

$$(\rho v_0 d / \eta)^2 = \{170 \cdot (\eta / \rho v_0 d) \cdot (1 - \epsilon) + 1,75\}^{-1} \cdot (g \rho d^3 / \eta^2) \cdot (\rho_{\text{deeltje}} - \rho) \cdot \epsilon^3$$

ϵ (porositeit van het bed = 0,25 voor een net opgetild bed), η (viscositeit van water), overige symbolen zie boven) .

Deze vergelijking levert een minimale v_0 op van 0,4 m/uur tot 6,5 m/uur. In de laboratorium Anammox fluïde-bedreactor was v_0 2,2 m/uur.

effectief vermogen benodigd voor de fluïdisering van het bed

Het vermogen is gelijk aan het volumedebiet vermenigvuldigd met de drukval. De drukval wordt gelijkgesteld aan de hydrodynamische druk onderaan het bed:

$$P = \Phi \cdot \Delta p = (v_0 V_{\text{reactor}} / H_{\text{reactor}}) \cdot \{[\rho \cdot \epsilon + \rho_{\text{deeltje}} \cdot (1-\epsilon)] \cdot H_{\text{reactor}} \cdot g\}$$

Φ (volumedebiet), Δp (drukval), V, H_{reactor} (volume en hoogte van reactor), overige symbolen zie boven).

effectiviteit van de slibretentie

Er is 5000 tot 25000 kg DS slib in de reactor aanwezig; per dag is er een aangroei van slechts 85 kg DS. Dat betekent dat de reactor minder dan 0,3 tot 1,7% van het aanwezige slib mag verliezen. De slibretentie moet dus effectief zijn (98,3 tot 99,7% per dag).

gasproductie

De gasproductie is als volgt te berekenen: $\text{NH}_4^+\text{-N}$ vracht/14 · molair volume (24 m^3/kmol) = 770 Nm^3/dag . Dit gas zorgt voor een vloeistofverplaatsing van dezelfde grootte-orde als de recirculatie. De reactor zou dus in staat moeten zijn zichzelf te mengen.

vloeistofverblijftijd

Kan worden berekend door het reactorvolume te delen door het influent-vloeistofdebiet (500-1000 m^3/dag).

zuurverbruik

Zie tabel 8. De buffercapaciteit per kg $\text{NH}_4^+\text{-N}$ is hier echter in het gunstigste geval twee keer zo groot als in tabel 8.

warmteproductie

Volgt uit de reactievergelijkingen gegeven bij tabel 8. Per kg ammonium wordt 20794 kJ warmte geproduceerd.

$$(332 \cdot 10,6 - 375) / (0,2 + 10,6) = 291 \text{ kJ/mol } \text{NH}_4^+ = 20794 \text{ kJ/kg } \text{NH}_4^+\text{-N}$$

Bij een gecombineerde nitrificatie/Anammox wordt nog 18080 kJ geproduceerd per kg ammonium.

$$(1/2,2) \cdot (332 \cdot 10,6 - 375) / (0,2 + 10,6) + (1,2/2,2) \cdot (260 \cdot 13,8 - 331) / (0,9 + 13,8) = 18080 \text{ kJ/kg } \text{NH}_4^+\text{-N}$$

stijging van de temperatuur van het slibgistingwater

De temperatuurstijging is als volgt te berekenen:

$$1 \cdot 10^7 \text{ kJ warmte /dag in } 500\text{-}1000 \text{ m}^3 \text{ water (soortelijke warmte } 4200 \text{ kJ/m}^3\text{)}.$$

Dus 2,5-5°C voor Anammox en 2,2-4,3°C voor een gecombineerd nitrificatie/Anammoxproces.

