

stowa

EVALUATIE VAN REJECTIEWATERBEHANDELING
OP SLIBVERWERKINGSBEDRIJF SLUISJESDIJK

SHARON- ANAMMOX- SYSTEMEN



RAPPORT

2008
18

SHARON-ANAMMOX-SYSTEMEN

EVALUATIE VAN REJECTIEWATERBEHANDELING
OP SLIBVERWERKINGSBEDRIJF SLUISJESDIJK

RAPPORT

2008

18

ISBN 978.90.5773.416.8



Publicaties van de STOWA kunt u bestellen op www.stowa.nl

COLOFON

UITGAVE STOWA, Utrecht 2008

PROJECTUITVOERING

W. van Betuw, Royal Haskoning

W. Wiegant, Royal Haskoning

J. Kruit, Royal Haskoning

BEGELEIDINGSCOMMISSIE

J. Mulder, Waterschap Hollandse Delta, thans Vitens

J.O.J. Duin, Waterschap Hollandse Delta

V. Claessen, Waterschap De Dommel

M.C.M. van Loosdrecht, TU Delft

M.S.M. Jetten, Radboud Universiteit Nijmegen

H. van der Spoel, Waterschap Rivierenland

C.A. Uijterlinde, STOWA

DRUK Kruyt Grafisch Adviesbureau

STOWA rapportnummer 2008-18
ISBN 978.90.5773.416.8

TEN GELEIDE

De behandeling van rejectiewater op rwzi's in Nederland wordt de laatste jaren meer en meer toegepast. Dit is te danken aan ontwikkelingen in de toepasbare technologieën. Deze technologieën hebben aansprekende namen als SHARON, One-step-Anammox, Demon, Babe en CANON.

De ontwikkelingen in het onderzoek naar anammox bacteriën (die ammonium met nitriet in stikstofgas omzetten) heeft ervoor gezorgd dat deze nu ook wordt ingezet in de rejectiewaterbehandeling. Deze techniek kent een lagere zuurstofbehoefte dan andere technieken voor de behandeling van rejectiewater en gebruikt geen C-bron. Daarom kan de techniek als duurzamer worden beschouwd.

Voor de toepassing van een dergelijk systeem bij de waterbeheerders in Nederland is het wenselijk om de opgedane praktijkervaringen te evalueren. In deze rapportage staat de praktijktoepassing op slibverwerkingsbedrijf Sluisjesdijk centraal. Hier werd voor het eerst in de praktijk een SHARON[®]-reactor gecombineerd met het Anammox[®]- proces. Inmiddels worden op anammox gebaseerde processen ook elders toegepast.

Daarnaast wordt in het rapport ingegaan op de geïntegreerde versie van het gecombineerde Sharon-Anammox proces, namelijk de systemen waarin nitrificatie tot nitriet en het anammox proces in één reactor plaatsvinden.

Na een langdurige opstart zijn te Sluisjesdijk de gewenste resultaten en de ontwerpbelasting ruim gehaald. Van de ervaringen kan veel worden geleerd, zodat deze opstartproblemen in nieuwe situaties voorkomen kunnen worden. Daarnaast neemt de beschikbare hoeveelheid anammox slib toe waardoor deze duurzame technologie een robuustere positie op de markt krijgt.

Utrecht, 2008

de directeur van de STOWA
Ir. J.M.J. Leenen

SAMENVATTING

De STOWA is in 2002 een onderzoek gestart naar de behandeling van rejectiewater met behulp van het gecombineerde SHARON[®]- en Anammox[®] proces. Op het slibverwerkingsbedrijf Sluisjesdijk is in eerste instantie een Sharon reactor gebouwd (1999) voor de eentraps nitrificatie-denitrificatie. Naar aanleiding van de positieve resultaten van het laboratoriumonderzoek op de TU Delft naar het Anammoxproces is besloten om de eerste gecombineerde full-scale Sharon-Anammox installatie in bedrijf te nemen (2002). De bedrijfsvoering van de Sharon veranderde hierdoor aanmerkelijk, omdat er geen denitrificatie meer nodig was, slechts circa 43% van het ammonium geoxideerd hoefde te worden en pH-correctie niet meer nodig was. Na zes jaar is de balans opgemaakt en wordt het systeem geëvalueerd.

DOELSTELLING

Op basis van de praktijkgegevens van Sluisjesdijk wordt het gecombineerde Sharon-Anammox proces geëvalueerd, inzicht verschaft in de verscheidenheid aan soortgelijke Anammox-systemen en wordt een handreiking voor het ontwerp gegeven voor de mogelijke toepassing op rwzi's in Nederland.

REJECTIEWATERBEHANDELING SLUISJESDIJK

Het slib van de rwzi Dokhaven wordt vergist en ontwaterd op het slibverwerkingsbedrijf Sluisjesdijk. Het rejectiewater van het slibverwerkingsbedrijf wordt teruggevoerd naar de rwzi Dokhaven. Het aandeel van de stikstof uit het rejectiewater in de totale stikstofvracht van de rwzi bedraagt circa 15%.

Sharon

De Sharon reactor van Sluisjesdijk is ontworpen op een stikstofvracht van circa 827 kg N/d. In de gecombineerde uitvoering dient slechts een gedeelte van het ammonium te worden genitriteerd tot een verhouding van ammonium en nitriet van 1:1,3. Dit wordt in de praktijk redelijk goed gehaald. De procescondities vragen alleen nog warmte en lucht en de dosering van methanol en natronloog vervalt. De bedrijfsvoering is daardoor ook een stuk eenvoudiger geworden.

Anammox

Anammox is anoxische oxidatie van ammonium door autotrofe bacteriën. De Anammox reactor is ontworpen voor een belasting van 492 kg N/d. De ontwerpbelasting is 7 kg N/m³ reactor. Bij de opschaling is gekozen om de "pilot plant" fase over te slaan, en de praktijkaspecten direct met de eerste full-scale installatie te leren. Daardoor heeft het lang geduurd voordat de ontwerpbelasting werd gehaald. Dit had voor een deel te maken met de lage groeisnelheid van anammox bacteriën. Momenteel is de bedrijfsvoering stabiel en wordt totaalstikstof voor 84% verwijderd. Het proces vergt echter in vergelijking met conventionele biologische zuiveringsprocessen een verhoogde inspanning van het personeel.

EINDEVALUATIE SLUISJESDIJK

De stikstofverwijdering van het tweetraps Sharon-Anammox-proces te Sluisjesdijk functioneert boven verwachting. De ontwerpbelasting is overtroffen en het verwijderingsrendement van totaalstikstof bedroeg 84%. Het rendement van de verwijdering van ammonium en nitriet was meer dan 90%.

Incidenteel komt het rendement in gevaar door processtoringsen, echter dit heeft geen directe negatieve gevolgen voor het functioneren van de rwzi Dokhaven en het behalen van het vereiste jaarrendement dat het waterschap voor het gebied dient te halen.

Robuustheid en risico's

Uit de resultaten mag geconcludeerd worden dat het systeem redelijk robuust functioneert en dat de ontwerpspecificaties ruimschoots worden gehaald. De lage groeisnelheid van de anammox bacteriën maakt het risico op een langere verstoorde periode groter.

Ervaringen operators

De bedrijfsvoering van de Sharon reactor in het gecombineerde proces wordt als niet ingewikkeld en beheersbaar beoordeeld. Dit in tegenstelling tot de iets ingewikkelder bedrijfsvoering van de Sharon als die wordt ingezet als volledig stikstofverwijderingsproces.

De bedrijfsvoering van de Anammox wordt wel als complexer ervaren dan die van de overige processen. De operators waren bij aanvang elke dag het systeem aan het monitoren om procesverstoringen vroegtijdig te signaleren, zodat ze accuraat en op korte termijn maatregelen konden treffen. De verwachting is dat deze inspanning op termijn kan afnemen. De zorg voor de reactor zal intensiever blijven in vergelijking met andere processen.

Toepasbaarheid elders

Het waterschap heeft aangegeven dat de toepasbaarheid van het proces afhangt van het tekort aan nitrificatiecapaciteit of denitrificatiecapaciteit van de rwzi, en de verhouding BZV : N in het rejectiewater. Introductie van een deelstroombehandeling is te overwegen indien er sprake is van een beperking in de reactorruimte en zuurstofaanbod.

HANDREIKING ONTWERPASPECTEN

In de handreiking voor het ontwerp wordt inzicht verschaft in de condities waaronder deelstroombehandeling in het algemeen zinvol zou kunnen zijn. Daarnaast wordt in het bijzonder de kosteneffectiviteit van N-verwijdering in een eentrapssystemen vergeleken met N-verwijdering in de hoofdstroom. Bij een schaalgrootte die voldoende groot is om slibgisting te rechtvaardigen, heeft het toepassen van deelstroombehandeling in een nitritatie - anammox combinatie in een nieuw te bouwen installatie vrijwel altijd zin. Alleen bij een schaal kleiner dan circa 60 kg N/d (in rejectiewater) is behandeling in de hoofdstroom efficiënter.

SYSTEEMVERGELIJKING

In de praktijk zijn er momenteel verschillende procestoepassingen van de al dan niet gecombineerde nitritatie-anammox reactie. De eentrapsvaariant wordt hierbij geprefereerd boven de tweetrapsvariant.

De eentrapsvaariant kan momenteel goed worden uitgevoerd met een korrelslibreactor of een sequencing batch reactor (SBR). De waargenomen maximale volumetrische conversiesnelheid van N-totaal is het hoogst in een korrelslibreactor. Het ruimtebeslag van een korrelslibreactor zal mede daarom aanzienlijk lager zijn. Een ander voordeel van de korrelslibreactor is dat het systeem ongevoeliger is voor inspoeling van zwevende stof. De investeringskosten voor de systemen lijken elkaar weinig te ontlopen. De minder complexe bedrijfsvoering van een SBR leidt, naar aan te nemen valt, tot wat lagere personele kosten dan bij de korrelslibreactor

DE STOWA IN HET KORT

De Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer, kortweg STOWA, is het onderzoeksplatform van Nederlandse waterbeheerders. Deelnemers zijn alle beheerders van grondwater en oppervlaktewater in landelijk en stedelijk gebied, beheerders van installaties voor de zuivering van huishoudelijk afvalwater en beheerders van waterkeringen. Dat zijn alle waterschappen, hoogheemraadschappen en zuiveringsschappen en de provincies.

De waterbeheerders gebruiken de STOWA voor het realiseren van toegepast technisch, natuurwetenschappelijk, bestuurlijk juridisch en sociaal-wetenschappelijk onderzoek dat voor hen van gemeenschappelijk belang is. Onderzoeksprogramma's komen tot stand op basis van inventarisaties van de behoefte bij de deelnemers. Onderzoekssuggesties van derden, zoals kennisinstituten en adviesbureaus, zijn van harte welkom. Deze suggesties toetst de STOWA aan de behoeften van de deelnemers.

De STOWA verricht zelf geen onderzoek, maar laat dit uitvoeren door gespecialiseerde instanties. De onderzoeken worden begeleid door begeleidingscommissies. Deze zijn samengesteld uit medewerkers van de deelnemers, zonodig aangevuld met andere deskundigen.

Het geld voor onderzoek, ontwikkeling, informatie en diensten brengen de deelnemers samen bijeen. Momenteel bedraagt het jaarlijkse budget zo'n zes miljoen euro.

U kunt de STOWA bereiken op telefoonnummer: 030 -2321199.

Ons adres luidt: STOWA, Postbus 8090, 3503 RB Utrecht.

Email: stowa@stowa.nl.

Website: www.stowa.nl

SUMMARY

In 2002, STOWA (the Dutch Foundation for Applied Water Research) has started an investigation into the treatment of reject water with the use of a combined SHARON[®]- and Anammox[®] process. In the sludge treatment facility Sluisjesdijk first a Sharon reactor was constructed (1999) for one-step nitrification - denitrification. Based on the positive results of laboratory research into the Anammox process at the Delft Technical University, it was decided to construct the first full-scale combined Sharon-Anammox installation (2002). The operation of the Sharon reactor changed, since denitrification was no longer required. Only approximately 43% of the ammonium needed to be oxidised, and pH-correction was not necessary. After six years of operation this system is evaluated here.

GOAL

Using practical data of the Sluisjesdijk facility the combined Sharon- Anammox process is evaluated, and insight is presented into various similar Anammox systems. A guideline for possible application on WWTPs in The Netherlands is also presented.

REJECT WATER TREATMENT AT SLUISJESDIJK

Sludge of the WWTP of Dokhaven is digested and dewatered at the sludge treatment facility Sluisjesdijk. The reject water of the facility is returned to the WWTP Dokhaven. The proportion of the nitrogen from the reject water is approximately 15% of the total nitrogen load to the plant.

Sharon

The Sharon reactor of Sluisjesdijk was designed for a nitrogen load of approximately 827 kg N/d. In the combined system only a part of the ammonium needs to be converted, until a ratio of ammonium to nitrite of 1: 1.3 is achieved. This is easily done in practice. The process conditions only demand heat and air. Dosage of methanol and caustic is not necessary. Hence, operation has become appreciably simpler.

Anammox

Anammox is anoxic oxidation of ammonium by autotrophic bacteria. The Anammox reactor was designed for a load of 492 kg N/d. Design loading was 7 kg N/m³ reactor. During scale-up of the process it was decided to skip the pilot phase, and learn practical aspects at once from a full-scale installation. It took a long time before the design loading was achieved. This was partly due to the low growth rate of the anammox bacteria. Today operation is stable and total nitrogen is removed for 84%. Operation of the process requires more attention, compared with other biological processes.

FINAL EVALUATION SLUISJESDIJK

Nitrogen removal at the two-step process at Sluisjesdijk performs better than expected. The design loading rate has been exceeded, and total nitrogen removal efficiency amounted to 84%. Removal efficiency of ammonia and nitrite was more than 90%. Incidentally process disturbances lower the removal efficiency; this has no direct negative effects on the functioning of the Dokhaven WWTPS and the overall efficiency for nitrogen removal that the Water Board needs to achieve.

Robustness and risks

From the operational results it can be concluded that the system functions reasonably robust, and that the design specifications are met easily. The low growth rate of the anammox bacteria increases the risk on a long period with disturbed operation.

Experiences of operators

The operation of the Sharon reactor in the combined process is considered not complex and manageable. In comparison, the operation of the Sharon reactor when used as a complete nitrogen removal process is considered somewhat more complex.

The operation of the Anammox reactor is considered more complex as that of other processes. The operators were initially monitoring each day to detect process disturbances, as to take adequate measures as soon as possible. It is expected that this input may be reduced sooner or later. The reactor will require more attention as compared to other processes.

Applicability elsewhere

The Water Board has indicated that the applicability of the process will depend on the shortage of nitrification capacity or denitrification capacity of the WWTP, and the ratio between BOD and N in the reject water. Introduction of a reject water treatment may be considered if there is a restriction in reactor volume or oxygen supply.

GUIDELINE OF DESIGN ASPECTS

In the guideline for the design, insight is given in the conditions which will allow for a profitable reject water treatment. To do so, the cost-effectiveness of nitrogen removal in a one-step system is compared with that of nitrogen removal at the WWTP. With a scale sufficiently large to warrant the application of sludge digestion, application of reject water treatment in a combined nitrification - anammox combination in a new WWTP virtually always is useful. Only at a scale less than c. 60 kg N/d (in the reject water) treatment in the WWTP is more efficient.

System comparison

At present, there are several full-scale applications of the non-combined and the combined nitrification-anammox system. The one-reactor system is preferred over the two-reactor system.

The one-reactor system can be implemented with a granular sludge reactor or a sequencing batch reactor (SBR). The highest volumetric conversion rates are experienced in a granular sludge reactor. This results in a considerably smaller footprint of the granular sludge reactor. Another advantage of the granular sludge reactor is that it is less sensitive for suspended solids entering the reactor. The investment costs for both systems seem comparable. The less complex operation of a SBR will conceivably result in lower personnel costs, as compared to a granular sludge reactor.

DE STOWA IN BRIEF

The Foundation for Applied Water Research (in short, STOWA) is a research platform for Dutch water controllers. STOWA participants are all ground and surface water managers in rural and urban areas, managers of domestic wastewater treatment installations and dam inspectors.

The water controllers avail themselves of STOWA's facilities for the realisation of all kinds of applied technological, scientific, administrative legal and social scientific research activities that may be of communal importance. Research programmes are developed based on requirement reports generated by the institute's participants. Research suggestions proposed by third parties such as knowledge institutes and consultants, are more than welcome. After having received such suggestions STOWA then consults its participants in order to verify the need for such proposed research.

STOWA does not conduct any research itself, instead it commissions specialised bodies to do the required research. All the studies are supervised by supervisory boards composed of staff from the various participating organisations and, where necessary, experts are brought in.

The money required for research, development, information and other services is raised by the various participating parties. At the moment, this amounts to an annual budget of some 6,5 million euro

For telephone contact number is: +31 (0)30-2321199.

The postal address is: STOWA, P.O. Box 8090, 3503 RB, Utrecht.

E-mail: stowa@stowa.nl.

Website: www.stowa.nl.

SHARON-ANAMMOX-SYSTEMEN

INHOUD

	TEN GELEIDE	
	SAMENVATTING	
	STOWA IN HET KORT	
	SUMMARY	
	STOWA IN BRIEF	
1	INLEIDING	1
	1.1 Achtergrond	1
	1.2 Patent en registratie	1
	1.3 Probleemstelling en doel	1
	1.4 Leeswijzer	1
2	ACHTERGROND	2
	2.1 Stikstofverwijdering	2
	2.2 Deelstroombehandeling	2
	2.2.1 Sharon	3
	2.2.2 Anammox	5
	2.2.3 Procestoepassingen	6
	2.2.4 Gecombineerde processen	7
3	EVALUATIE SHARON-REACTOR TE SLUISJESDIJK	8
	3.1 Dimensionering	8
	3.2 Procescondities	9
	3.3 Verbruik van energie en hulpstoffen	9
	3.3.1 Elektriciteitsverbruik	9
	3.3.2 Warmte	9
	3.3.3 Lucht	9
	3.3.4 Chemicaliën	10

3.4	Procesmetingen en regelingen	10
3.5	Zuiveringsrendementen van het systeem	10
3.6	Bedrijfszekerheid en risico's	11
3.7	Operationele en investeringskosten	11
3.8	Civieltechnische en mechanische aspecten	12
4	EVALUATIE ANAMMOX TE SLUISJESDIJK	13
4.1	Dimensionering	13
4.2	Voorbehandeling	14
4.3	Procescondities	15
4.4	Procesmetingen en regelingen	15
4.5	Opstart	16
4.6	Verbruik van energie en hulpstoffen	17
	4.6.1 Elektriciteitsverbruik	17
	4.6.2 Warmte	17
	4.6.3 CO ₂	17
4.7	Zuiveringsrendementen van het systeem	18
4.8	Bedrijfszekerheid en risico's	19
	4.8.1 Storingen tijdens de aanloop	19
	4.8.2 Storingen inherent aan de Anammox reactor te Sluisjesdijk	20
4.9	Operationele en investeringskosten	20
5	EINDEVALUATIE DEELSTROOMBEHANDELING SLUISJESDIJK	22
5.1	Combinatie Sharon-Anammox	22
6	HANDREIKING KEUZE EN ONTWERP	24
6.1	Deelstroombehandeling: gewenst of niet?	24
	6.1.1 Randvoorwaarden	24
	6.1.2 Energieverbruik bij deelstroombehandeling	24
	6.1.3 Ruimtegebruik en kosten	25
	6.1.4 Groene Weide	26
	6.1.5 Extern slib	27
	6.1.6 Bestaande situaties	27
6.2	Ontwerpaspecten van deelstroombehandeling	27
6.3	Beheersaspecten	28
7	TOEKOMSTIGE SYSTEMEN VOOR N-VERWIJDERING	29
7.1	Eentraps nitritatie - anammox systemen	29
7.2	Systeemvergelijking	30
7.3	Emissie van stikstofoxiden	31
7.4	Energiereductie	32
8	REFERENTIES	33

1

INLEIDING

1.1 ACHTERGROND

In 2002 is door STOWA een aanvang gemaakt met een evaluatie van systemen voor de verwijdering van stikstof uit deelstromen van rwzi's op praktijkschaal. Wegens een langere opstarttijd van het Anammox proces is dit project slechts gedeeltelijk uitgevoerd. Over het uitgevoerde deel is een deelrapport gepubliceerd¹. Nu het gecombineerde Sharon-Anammox-systeem op rwzi Dokhaven goed functioneert, is het tijd om het ontbrekende deel van de evaluatie alsnog te publiceren. Er is namelijk veel te leren van de potentieel kostenbesparende systemen voor deelstroombehandeling. Bovendien kan deze wijze van deelstroombehandeling als zeer duurzaam worden aangemerkt, door het geringe energieverbruik. Dit rapport is dus een vervolg op het eerdere deelrapport.

1.2 PATENT EN REGISTRATIE

In deze rapportage zijn een aantal systemen beschreven waarop patentregistratie van toepassing is. Vanwege de leesbaarheid van deze rapportage is er voor gekozen om niet achter elke mogelijk patent of registratie een ® symbool te plaatsen.

1.3 PROBLEEMSTELLING EN DOEL

Er is behoefte aan een evaluatie van het Sharon- en Anammox proces, en daaruit voortvloeiende en gerelateerde processen voor de behandeling van de stikstofrijke retourwaterstromen in Nederlandse rwzi's op basis van de praktijkgegevens van slibverwerkingsbedrijf Sluisjesdijk. Er wordt ook een vergelijking gemaakt met de 'oude' of 'eerste generatie' Sharon van Sluisjesdijk.

Tevens is het van belang dat algemene richtlijnen voor het ontwerp en randvoorwaarden voor de toepassing worden geformuleerd. Aan de hand van de evaluatie van de systemen is dit gedaan. Er is hiermee tevens een praktische handleiding voor toekomstig ontwerp en beheer opgesteld.

1.4 LEESWIJZER

In hoofdstuk 2 wordt ingegaan op de achtergronden van systemen voor de deelstroombehandeling. In de volgende hoofdstukken wordt het functioneren van de Sharon en Anammox systemen te Sluisjesdijk geëvalueerd. In hoofdstuk 6 een handreiking voor het ontwerp en beheer gegeven. En tenslotte is vooruitgekeken naar toekomstige systemen voor N-verwijdering.

2

ACHTERGROND

In dit hoofdstuk wordt de achtergrond van het Sharon en anammox proces beschreven. Eerst komt de stikstofverwijdering aan bod en daarna wordt een overzicht van de deelstroombehandelingen gegeven.

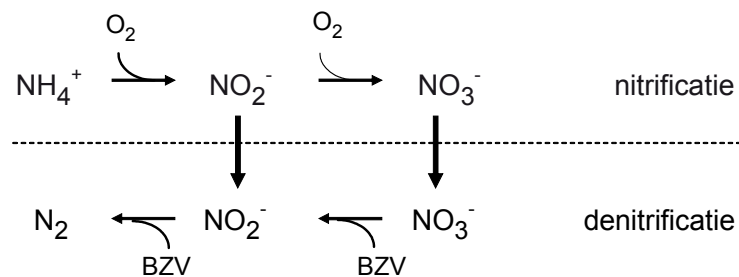
2.1 STIKSTOFVERWIJDERING

De verwijdering van stikstof uit afvalwater wordt bij zuivering van stedelijk afvalwater voornamelijk biologisch uitgevoerd. Allereerst dient nitrificatie plaats te vinden waarbij bacteriën ammoniumstikstof met behulp van zuurstof omzetten in nitriet en daarna in nitraat. Nitriet en nitraat kunnen elektronen accepteren van oxidatiereacties, en dus voor zogenaamde denitrificerende bacteriën de functie van zuurstof overnemen. Deze laatste bacteriën groeien op organische verbindingen (heterotroof), en hebben dus BZV nodig om te groeien. Bij de denitrificatie worden nitriet en nitraat omgezet in stikstofgas. Deze laatste verbinding is onschuldig en inert.

“Stikstofverwijdering” betekent dus eigenlijk “verwijdering stikstof uit de waterfase”. De omzettingen zijn schematisch weergegeven in figuur 1.

FIGUUR 1

SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN DE REACTIES BIJ NITRIFICATIE EN DENITRIFICATIE



Randvoorwaarden voor de nitrificatie zijn een voldoende hoge slijbleeftijd en een voldoende hoge zuurstofconcentratie. Denitrificatie met BZV kan plaatsvinden door recirculatie van nitraatrijke stromen naar een niet-beluchte ruimte, of in de tijd door intermitterende beluchting.

2.2 DEELSTROOMBEHANDELING

Op circa 90 van de in totaal 375 rwzi's in Nederland wordt zuiverings-slib vergist, van de eigen installatie en van elders aangevoerd. Op basis van de grootteverdeling van rwzi's in Nederland² kan worden geschat dat circa 70 - 75% van het geproduceerde slib wordt vergist. De kwantiteit vers slib in Nederland is in totaal jaarlijks ongeveer 450.000 ton droge stof³. In de gisting wordt het organische materiaal voor een groot deel omgezet in methaangas. Het organische gebonden stikstof wordt hierbij omgezet in ammonium. In de slibontwaterings-

installatie wordt het water en slib gescheiden. Het vrijgekomen water, dat rejectiewater of slibgistingwater wordt genoemd, bevat relatief veel ammonium en weinig CZV of BZV⁴. Het rejectiewater wordt weer teruggevoerd naar de rwzi en kan voor een stikstofbelasting in het hoofdproces van 10 - 15% zorgen.

Dit aandeel kan aanzienlijk hoger zijn als er sprake is van vergisting en ontwatering van extern aangevoerd slib.

Speciale technieken voor de verwijdering van stikstof uit rejectiewater hebben het voordeel dat:

- stikstof wordt verwijderd in een stroom waarin de concentratie hoog is (tussen de 500 – 1500 mg/l); zodat reactorvolumes klein kunnen blijven;
- deelstromen hebben vaak een hogere temperatuur (20 - 30°C), zodat de deelstroombehandeling compact kan zijn, en meerdere technieken mogelijk zijn;
- de stikstofvracht naar de rwzi wordt verlaagd (met circa 10 - 15% afhankelijk van de hoeveelheid en verhouding tussen rejectiewater en influent);
- de omzetting minder energie hoeft te kosten;
- als aanvullende dosering van een C-bron in de hoofdzuivering nodig is, kan de dosering geringer zijn bij toepassing van deelstroombehandeling.

Door deze wijze van stikstofverwijdering wordt de BZV/N verhouding in influent (inclusief interne stromen) gunstiger, waardoor deelstroombehandeling een bijdrage levert aan het bereiken van lage effluentconcentraties voor totaalstikstof.

2.2.1 SHARON

SHARON stond voor “single reactor system for high-activity ammonia removal over nitrite”⁵. De afkorting is later aangepast tot “stable high ammonia removal over nitrite”. Het is een één of twee reactorsysteem waarin de nitrificatie verloopt tot nitriet, in plaats van het gebruikelijke nitraat, en vervolgens nitriet wordt omgezet tot stikstofgas (zie figuur 2). Deze manier van stikstofverwijdering wordt ook wel de nitrietroute genoemd. De groei van bacteriën die nitriet omzetten in nitraat wordt bemoeilijkt door de keuze van de procescondities (verblijftijd en temperatuur).

Het onderzoek naar deze toepassing is aan de Technische Universiteit Delft gestart, als onderzoek naar een alternatieve methode voor nitrificatie en denitrificatie over nitriet in membraanbioreactoren. Er werd gevonden dat door denitrificatie (van meer dan 70% N) voldoende alkaliniteit wordt geproduceerd om het verzurende effect van de nitrificatie te compenseren. Dit werd in simulaties bevestigd.

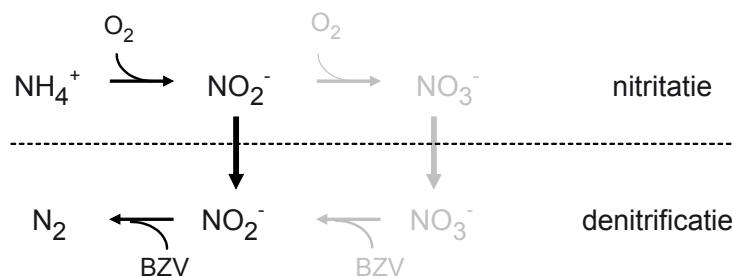
Het onderzoek naar gebruik van nitriet als intermediair in de N-verwijdering is gebaseerd op het door onderzoekers bij de TU-Delft⁵ voorgestelde principe van het gebruik van de slibleeftijd om nitrietoxidatie te voorkomen. Bij hogere temperaturen hebben nitrietoxideerders namelijk een langere slibleeftijd nodig dan ammoniumoxideerders. In de deelstroombehandeling is denitrificatie in feite alleen nodig om voldoende alkaliniteit te vormen om de pH verlaging in de nitrificatie te neutraliseren. Hiervoor leek een denitrificatie rendement van 70% voldoende te zijn⁶. pH correctie kan ook worden uitgevoerd middels dosering van loog. Voor de pH correctie was het gebruik van methanol gebaseerde denitrificatie economischer dan loog dosering⁷.

De denitrificatie werd bewerkstelligd door het intermitterend beluchten van de reactor (aërobe en anoxische omstandigheden) en de dosering van methanol als C-bron. Het cyclisch beluchten van de reactor had geen merkbare invloed op de activiteit van de nitrificeerders. Omdat de pH correctie met loogdosering duurder is dan door denitrificatie met methanoldosering werd de voorkeur gegeven aan de laatstgenoemde.

Dit proces kan worden uitgevoerd in een enkelvoudig of een tweetraps reactorsysteem door een korte aërobe sibleeftijd, van ongeveer anderhalve dag of korter, aan te houden bij een hoge temperatuur van 25 - 40°C. Doordat nitriet het intermediair in de denitrificatie is, gebruikt het proces minder zuurstof (tot 25%) en minder C-bron (tot 40%) dan de conventionele stikstofverwijdering. Zie figuur 2 voor een illustratie.

FIGUUR 2

SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN DE REACTIES IN EEN SHARON-SYSTEEM; HET LICHT AANGEGEVEN DEEL VAN DE ROUTE VOOR NITRIFICATIE EN DENITRIFICATIE (VERGELIJK MET FIGUUR 1) WORDT 'AFGESNEDEN'

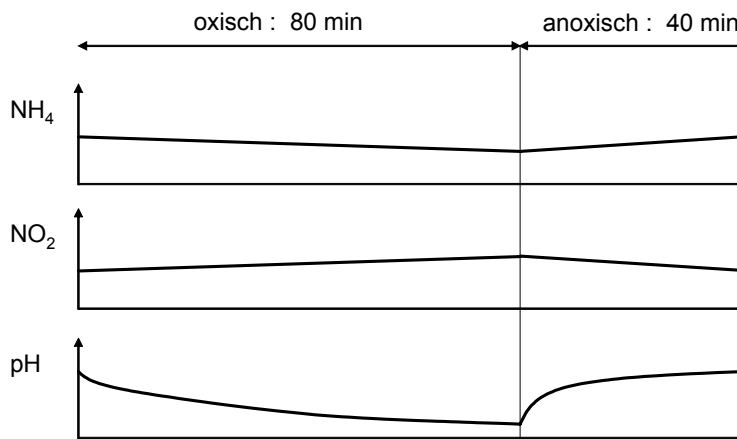


In Nederland zijn verschillende Sharon reactoren geplaatst op de rwzi's in Rotterdam, Utrecht (twee tanks), Zwolle (twee tanks), Beverwijk (twee tanks), Groningen (twee tanks) en Den Haag⁸. Daarnaast wordt een Sharon gebouwd op een rwzi van New York en voorbereid in Parijs, Genève, en twee in Engeland. De verwijderingsrendementen voor ammonium, behaald op de Nederlandse rwzi's liggen tussen de 80 en 98% bij een aërobe verblijftijd van 1,3 tot 1,8 dagen. Op enkele installaties wordt een andere C-bron dan het tot voor kort gebruikelijke methanol gebruikt. De procescondities gedurende de onbeluchte en beluchte periode in het Sharon systeem zijn gegeven in figuur 3.

De keuze voor een of twee reactoren hangt samen met de hoogte van de NH_4^+ -concentratie, en het feit dat bij hoge concentraties aan de ene kant de overcapaciteit van de te installeren beluchting oneconomisch wordt, en aan de andere kant de benodigde ruimte zo groot, dat de lage verblijftijd niet meer gegarandeerd kan worden.

FIGUUR 3

SCHEMATISCHE WEERGAVE PROCESCONDITIES IN EEN SHARON1, IN EEN ÉENTRAPSSYSTEEM

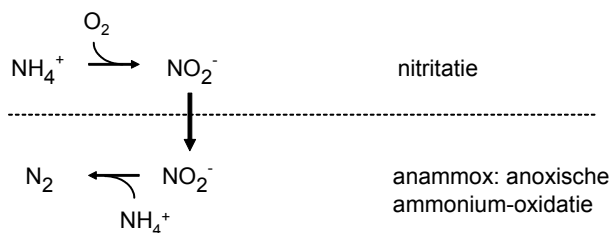


2.2.2 ANAMMOX

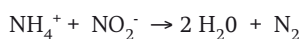
Anammox is anoxische oxidatie van ammonium door autotrofe anammox bacteriën. Dit proces is voor het eerst waargenomen in de pilot-waterzuivering van het voormalige Gist Brocades⁹. Het proces is gebaseerd op de reactie van nitriet met ammonium (zie figuur 4).

FIGUUR 4

SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN DE REACTIES IN EEN NITRITATIE-ANAMMOX SYSTEEM



De vereenvoudigde reactievergelijking van dit proces is:



De anammox bacteriën gebruiken ammonium, nitriet en bicarbonaat als substraat. Het bicarbonaat fungeert hierbij als C-bron voor de celopbouw. De oxidatie van nitriet tot nitraat zorgt voor de benodigde elektronen om CO_2 te reduceren tot organisch koolstof. De reactievergelijking is als volgt¹⁰:



In het proces wordt circa 10% van het ammonium omgezet in nitraat (afhankelijk van de slibopbrengst die weer een functie is van de slibleeftijd); het resterende wordt omgezet in stikstofgas. De optimale condities voor deze bacteriën zijn een pH tussen de 7 en 8,5 en temperatuur van 30 - 37 °C. Het probleem is dat de bacteriën buitengewoon langzaam groeien, de verdubbelingstijd bedraagt 11 dagen⁹. Hierdoor neemt de opstart van een reactor veel tijd in beslag, en is de herstelperiode na een processtoring ook aanzienlijk. Nieuwe inzichten geven aan dat een verdubbelingstijd van 7 - 9 dagen aannemelijk is¹¹.

2.2.3 PROCESTOEPASSINGEN

De omzetting van ammonium met behulp van anammox bacteriën kan plaatsvinden in één reactor of in twee gecombineerde reactoren. In hoofdstuk 5 worden de verschillende praktijktoepassingen vergeleken. In het onderstaande kader wordt de recentelijk voorgestelde naamgeving¹⁰ voor de verschillende processen gepresenteerd. Indien het proces plaatsvindt in een enkele reactor wordt er gebruik gemaakt van biofilm of korrelslib of actiefslibvlokken. In dit proces vindt de nitrificatie plaats aan de zuurstof-ontvangende buitenkant van de korrel of biofilm en de anammoxomzetting aan de binnenzijde ervan. Daarnaast kan in het proces worden gestuurd met de beluchte periodes, zodat aërobe en anoxische condities elkaar afwisselen.

TABEL 1 OVERZICHT VAN VERSCHILLENDE NAAMGEVINGEN EN PROCESTYPES VOOR REJECTIEWATERBEHANDELING

Procesnaam	omschrijving	namen
anammox	anoxische ammonium oxidatie: anoxische omzetting van nitriet en ammonium tot stikstofgas	Anammox
ééntraps nitrificatie - anammox	proces met gecombineerde productie van nitriet uit ammonium (nitrificatie) en het anammox proces in één reactor	Canon Oland 1-traps Anammox Demon® Deammonificatie
tweetraps nitrificatie - anammox	proces met partiële nitrificatie in de eerste en anammox proces in de tweede reactor	SHARON® - ANAMMOX® 2-traps Anammox
eentraps nitrificatie – denitrificatie	proces met gecombineerde nitrificatie tot nitriet en denitrificatie (met methanol, of andere C-bron)	SHARON®
anammox reactor	de reactor waarin het anammox proces optreedt.	

Het tweetrapsproces bestaat uit een aparte nitriet-vormende reactor en een aparte anammox reactor. Het Sharon proces (waarin stabiel nitriet kan worden gevormd) is ideaal om te combineren met het anammox proces.

Het anammox proces kan in verschillende reactortypen worden bedreven, waaronder in een SBR, gaslift reactor, moving bed reactor, *fluid* bed reactor, en biorotoren. In een STOWA onderzoek¹² is het anammox proces getest in een fluid bed reactor door de TU Delft in 1996. De resultaten van het onderzoek zijn gegeven in tabel 2.

TABEL 2 RESULTATEN FLUID BED REACTOR MET ANAMMOX BIJ TU DELFT¹²

Parameter	Eenheid	Fluide bed
Omzettingssnelheid van slib	kg NH ₄ ⁺ -N.kg ds ⁻¹ .d ⁻¹	0,02 - 0,13
Omzettingssnelheid in reactor	kg NH ₄ ⁺ -N.m ⁻³ .d ⁻¹	0,24 - 1,34
Zuurverbruik*	kg H ₂ SO ₄ ./ kg NH ₄ ⁺ -N	0,09
Slibproductie	kg DS.kg NH ₄ ⁺ -N ⁻¹	0,17
Slibbezinksnelheid	m/.h	20 - 40

*: op het zuurverbruik wordt later nog teruggekomen.

Later zijn hogere activiteiten gemeten. Slib uit een eentraps anammox proces kan een activiteit van circa 1 kg N.kg ds⁻¹.d⁻¹ hebben¹³.

2.2.4 GECOMBINEERDE PROCESSEN

In het CANON (Completely Autotrophic Nitrogen removal Over Nitrite) proces^{14,15} worden de nitritatie en de anammox reacties in één reactor gecombineerd. Het proces is dus een voorbeeld van een ééntraps nitritatie - anammox proces. Vergelijkbare omzettingen vinden plaats in biorotoren, in het zogenoemde OLAND proces (oxygen-limited autotrophic nitrification - denitrification).

In het DEMON proces worden nitritatie en anammox proces gecombineerd in een SBR, die een lagere volumebelasting kent dan het Canon proces. Het intermitterend beluchte proces wordt geregeld aan de hand van de pH, waarbij gestuurd wordt op zeer kleine pH verschillen (< 0,05). Dit systeem is gerealiseerd op de rwzi Glarnerland Zwitserland en rwzi Strass te Oostenrijk.

Het principiële voordeel van een gecombineerd proces is de besparing in het aantal reactoren, maar dat kan tevens het principiële nadeel zijn. Bij het gecombineerde proces wordt de reactor in feite bedreven onder condities die een compromis zijn voor wat beide type bacteriën nodig hebben. Bij gescheiden processen kan iedere reactor bedreven en gestuurd worden op de optimale condities voor de individuele groepen van bacteriën.

3

EVALUATIE SHARON-REACTOR TE SLUISJESDIJK

Het slib van de rwzi Dokhaven, plus dat van twee andere rwzi's, van samen circa 470.000 i.e. à 136 g TZV wordt vergist en ontwaterd op het slibverwerkingsbedrijf Sluisjesdijk. Het rejectiewater van het slibverwerkingsbedrijf wordt teruggevoerd naar de rwzi Dokhaven. Deze rwzi is ontworpen als een A-B systeem. Het aandeel van de stikstof uit het rejectiewater in de totale stikstofvracht van de rwzi varieert tussen de 10% en 16%.

Om de rwzi te ontlasten wordt sinds 1999 deelstroombehandeling toegepast. De deelstroombehandeling bestond in eerste instantie uit een Sharon reactor (eentraps nitritatie - denitrificatie). In 2002 is Sharon gecombineerd met het anammox proces (tweetraps nitritatie - anammox proces). De bedrijfsvoering van de Sharon veranderde hierdoor. Er was geen denitrificatie meer noodzakelijk, er was minder omzetting nodig tot aan nitriet nodig, en de pH regeling was niet meer nodig. In dit hoofdstuk wordt het Sharon proces van de installatie te Sluisjesdijk geëvalueerd. In het navolgende hoofdstuk komt de anammox aan bod.

3.1 DIMENSIONERING

De Sharon reactor van Sluisjesdijk is ontworpen op een stikstofbelasting van 827 kg N/d en een maximum debiet van 32 m³/h. De Sharon reactor is gebouwd in een bestaande indikker en heeft een watervolume van 1.717 m³. De reactor is vanwege het hergebruik van de indikker overgedimensioneerd. De installatie dient momenteel 50 - 60% van de ammoniumvracht om te zetten. De Sharon reactor is afgebeeld in figuur 5.

FIGUUR 5

SHARON REACTOR TE SLUISJESDIJK



3.2 PROCESCONDITIES

De aërobe verblijftijd in de reactor is 1,5 - 2 dagen (fysieke verblijftijd 3 dagen) en is sinds de omschakeling op alleen nitritatie hetzelfde gebleven. Ook de cyclustijd is hetzelfde gebleven, circa 2 uur. De groei van nitrietoxideerders wordt voorkomen door de hoge temperatuur in combinatie met de korte aërobe verblijftijd van 1,0 tot 1,5 dag. De duur van de anoxische periode volgt daaruit. Binnen de volgende range van condities functioneert de reactor goed:

- T: 32 - 37 °C. De setpoint ligt op 34 - 36 °C in de praktijk wordt een temperatuur gemeten van 32 - 33 °C. Zonodig wordt verwarmd met restwarmte van de gasmotoren.
- pH: In eerste instantie werd nog methanol gedoseerd om de denitrificatie te kunnen realiseren, echter na de proceswijziging is dit niet meer noodzakelijk. Hierdoor is de pH gezakt naar 5,9 - 6,2. Hierdoor stopt de nitrificatie en stabiliseert op 50% nitrificatie.
- EGV: Het ingaande elektrisch geleidingsvermogen (EGV) is circa 8 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$; het uitgaande EGV is circa 4 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$. Een hoger EGV is een indicatie voor nitriet-ophoping, of een onvolledige omzetting.

3.3 VERBRUIK VAN ENERGIE EN HULPSTOFFEN

3.3.1 ELEKTRICITEITSVERBRUIK

Het elektriciteitsverbruik van de Sharon reactor in Rotterdam wordt bepaald door beluchting, menging, pompen en randapparatuur. Het energieverbruik van de beluchting ten tijde van de toepassing van alleen de Sharon voor stikstofverwijdering was bij een omzetting van 483 kg N/dag circa 756.000 kWh/jaar¹⁶. De geschatte energiebesparing door toepassing van de Sharon als voorbehandeling van de Anammox was in 2004 circa 174.000 kWh/jaar.

Momenteel is het totale verbruik circa 620.500 kWh/jaar (2 kWh/kg N) waarvan 440.000 - 475.000 kWh/jaar wordt verbruikt door de beluchting (opgave Waterschap). De beluchtungsenergie bedraagt 80 - 85% van het totale energieverbruik van de Sharon. Het type beluchtungsysteem dat wordt toegepast is injectorbeluchting vanwege de lage verstoppingsgevoeligheid, relatief hoge temperatuur en een tankdiepte van 5 m. Dit systeem heeft een relatief hoog energieverbruik. In de Sharon op rwzi Houtrust en Groningen is geen injector beluchtungsysteem geïnstalleerd maar bellenbeluchting, echter daar komen verstoppingsproblemen voor.

3.3.2 WARMTE

De installatie is voor de combinatie met de Anammox volledig geïsoleerd om warmteverlies te voorkomen. Voorheen was deze isolatie niet nodig. De temperatuur van de ingaande stroom is gemiddeld 28 °C. Door opwarming door de bij de omzettingen vrijkomende energie, en met restwarmte van de WKK wordt de reactor verwarmde tot een setpoint van 34 - 36 °C. De tankisolatie en de toevoeging van warmte zijn nodig omdat de heterotrofe denitrificatie niet meer plaatsvindt en het nitritatierendement is verminderd. Op de installatie is naast een verwarming ook een koeling geïnstalleerd; deze koeling wordt alleen gebruikt bij hoge buitentemperaturen.

3.3.3 LUCHT

Lucht wordt gedoseerd voor de nitritatie. Het verbruik van zuurstof bedraagt in theorie ongeveer 3,4 kg/kg N belasting. Het zuurstofverbruik bedraagt bij een vracht van 827 kg N/dag circa 590.000 kg O₂ per jaar.

3.3.4 CHEMICALIËN

Voorheen werd aan de Sharon natronloog (33%) en methanol (99%) gedoseerd. Het verbruik van natronloog was in het jaar 2004 zeer laag (30 l/d). Het methanolverbruik bedroeg ca. 200.000 kg methanol/jaar. Sinds het gecombineerde proces aan de ontwerpspecificaties voldoet, is het verbruik van deze hulpstoffen gestopt.

3.4 PROCESMETINGEN EN REGELINGEN

In cyclus van de Sharon worden twee afzonderlijke periodes onderscheiden, een beluchte periode en onbeluchte periode. In de onbeluchte periode wordt het slib gemengd door mixers. In de reactor worden het zuurstofgehalte en de pH gemeten. De zuurstofsetpoint in de reactor ten tijde van beluchting was 2,5 mg/l. Dit kan als hoog worden beschouwd, ten opzichte van setpoints in conventionele systemen. De cyclusduur bedraagt circa 2 uur, de beluchte periode van circa 80 minuten is ondanks de omschakeling hetzelfde gebleven, ten einde oxidatie tot nitraat door ingroei van nitrietoxiderende bacteriën te verhinderen. De beluchtingstijd wordt (om de twee uur) berekend met het influentdebiet en de benodigde verblijftijd. Het voedingsdebiet is gedurende de periode constant.

De bedrijfsvoerder heeft aangegeven dat de bedrijfsvoering van de Sharon aanzienlijk minder complex is geworden sinds de overschakeling naar de combinatie met de Anammox. Dit komt onder andere door het overbodig zijn van de dosering van methanol en natronloog. Daarnaast is de ammoniumconcentratie niet meer kritisch. Voorheen was een stijgende ammoniumconcentratie een indicatie voor een procesverstoring. In de nieuwe situatie is de ammoniumconcentratie veel hoger. Het omzettingrendement is weliswaar lager, maar lijkt stabiel te zijn geworden.

3.5 ZUIVERINGSRENDEMENTEN VAN HET SYSTEEM

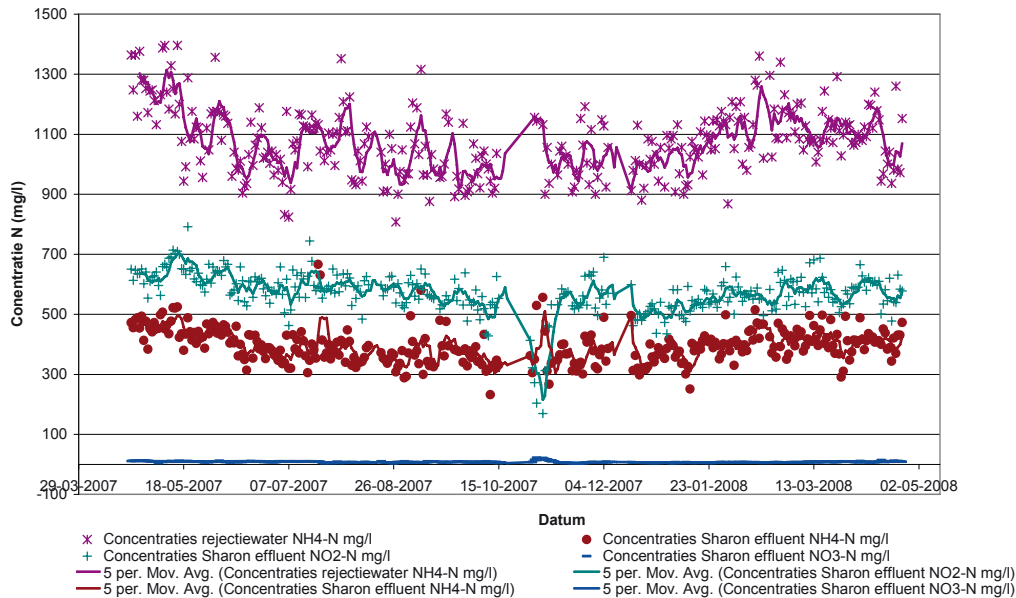
In de figuur 6 zijn de in- en uitgaande stikstofconcentraties van de Sharon tussen april 2007 en 2008 gegeven en daarbij de voortschrijdende gemiddeldes van vijf dagen. De ingaande concentratie ammonium varieert tussen de 800 en 1.400 mg/l. De concentratie ammonium in het effluent tussen de 300 en 550 mg/l. De nitrietconcentratie varieert tussen de 550 en 700 mg/l (met uitschieters naar beneden van 200 mg/l en naar boven van 800 mg/l).

De nitraatconcentratie in het effluent van de Sharon is gemiddeld 8 mg/l. Dit is gemiddeld 0,73% van de ammoniumconcentratie in het influent. Hieruit mag geconcludeerd worden dat de groei van nitrietoxideerders verhinderd wordt. Enige denitrificatie zou kunnen optreden, maar dat is onwaarschijnlijk¹⁸. Mogelijk treedt enige chemische nitraatvorming uit nitriet op¹⁸. De verhouding tussen NH_4^+ en NO_2^- kan beïnvloed worden door de pH. Bij hoge buffercapaciteit wordt mogelijk teveel NO_2^- gevormd.

De omzetting van ammonium in nitriet is gemiddeld 53%, hierin zijn wel de lage waarden na een storing meegenomen. Tijdens normale bedrijfsvoering is het gemiddelde nog iets hoger. De omzetting dient 55% te zijn en wordt bij benadering redelijk goed gehaald. De gewenste verhouding tussen nitriet en ammonium in het effluent is in Sluisjesdijk 1,3. De gemiddelde verhouding in de praktijk is 1,47.

Deze verhouding kan op andere rwzi's verschillend zijn, afhankelijk van de afvalwatersamenstelling. De eenvoud van de reactorregeling wordt veroorzaakt doordat de verhouding tussen bicarbonaat en ammonium in het influent ongeveer 1 mol/mol is. Bij bijvoorbeeld ijzerdoserings in de sliblijn zal dit anders zijn en wordt de regeling complexer.

FIGUUR 6 CONCENTRATIE STIKSTOF IN- EN EFFLUENT VAN DE SHARON. "5 PER. MOV. AVG" BETEKENT VOORTSCHRIJDENDE GEMIDDELDE (MOVING AVERAGE) OVER VIJF WAARNEMINGEN



3.6 BEDRIJFSZEKERHEID EN RISICO'S

In het begin van het bedrijf met de SHARON installatie trad neerslagvorming op in de aanvoerpompen, onder meer struviet. Hierdoor was de aanvoer niet altijd even constant. Door het toepassen van anti-scaling aan het rejectiewater en later door een verandering in de wijze van fosfaatverwijdering werd het probleem verholpen. De laatste jaren is geen struvietvorming meer waargenomen.

In oktober 2007 is de Sharon reactor 3 weken buiten bedrijf geweest vanwege een inspectie. Het slib werd in de indikker onbelucht opgeslagen. De reactor werd daarna weer opgestart met het opgeslagen slib en met slib uit de B-trap. De opstartperiode bedroeg slechts 1 week. Indien alleen met B-trap slib wordt opgestart bedraagt de opstartperiode 3 - 4 weken.

3.7 OPERATIONELE EN INVESTERINGSKOSTEN

De operationele kosten bestaan uit bedrijfsvoering, onderhoud en energieverbruik.

- Onderhoudswerkzaamheden, procesregistratie en -sturing kosten de operator 1,5 uur per dag. De bedrijfsvoering is momenteel 7 dagen per week nodig. Dit komt neer op een tijdsbesteding van circa 550 uur per jaar. De kosten van de personele inzet in de bedrijfsvoeringskosten zijn bij een uurtarief van € 50,- jaarlijks € 27.400,-.
- Het energieverbruik is circa 756.500 kWh per jaar (opgave Waterschap). Dit is exclusief de eventuele warmtebehoefte. Met een energieprijis van € 0,12 per kWh komt dit overeen met € 91.000,- per jaar.

De investeringskosten van de Sharon zijn een factor twee hoger geworden dan gepland, circa € 3,2 miljoen. Dit werd veroorzaakt door enerzijds de verwevenheid in de bestaande situatie (met name een beperkte ruimte) en anderzijds door de benodigde verwarmingsisolatie, titanium warmte wisselaar in verband met hoge chloride gehalten, ondergrondse methanol opslag, het ventilatiesysteem, koelapparatuur en initiële ontwikkelingskosten. Deze kosten kunnen niet zomaar worden geprojecteerd op andere situaties. Deze kosten zouden onder 'groene weide'-condities naar verwachting circa 50% lager zijn (persoonlijke mededeling Floor Besten van Waterschap Hollandse Delta).

3.8 CIVIELTECHNISCHE EN MECHANISCHE ASPECTEN

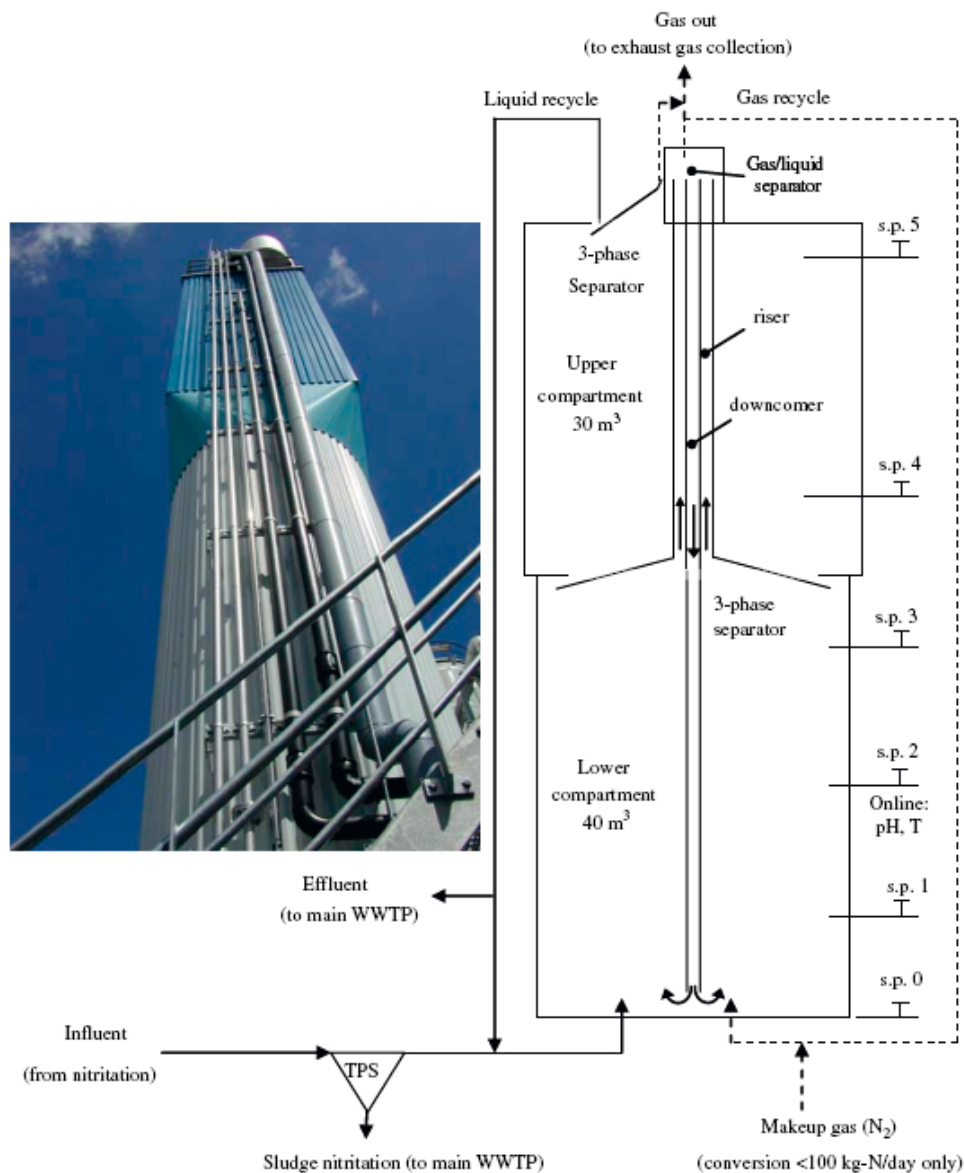
De zorg was dat door de lagere zuurgraad zonder denitrificatie civieltechnische en mechanische onderdelen zouden kunnen worden aangetast. Tot nu toe hebben zich hierbij -gedurende zes jaar- nog geen problemen voorgedaan.

4

EVALUATIE ANAMMOX TE SLUISJESDIJK

In dit hoofdstuk is het Anammox proces op Sluisjesdijk beschreven. De reactor is afgebeeld in figuur 7.

FIGUUR 7

ANAMMOX REACTOR TE SLUISJESDIJK¹⁹

4.1 DIMENSIONERING

De Anammox reactor is ontworpen voor een belasting van 492 kg N/d en een maximum debiet van 35 m³/h. De reactor heeft een watervolume van 70 m³ en een hoogte van 16 m.

De reactor is een IC-reactor waarbij een geforceerde gasloop wordt bewerkstelligd door een gascompressor voor de menging van de reactor. Het gevormde stikstofgas wordt gerecirculeerd met drie toevoerleidingen. De reactor bestaat twee compartimenten die gescheiden zijn door een bezinkgedeelte. Daarnaast is er een bezinker die als laatste stap fungeert om het anammox slib te behouden. De diameter van de reactor is 2,25 m; de onderste helft van de reactor is rond en dient voor circa 95% de conversie te volbrengen. Halverwege de reactor gaat dit over in vierkant vanwege de rechthoekige vorm van de bezinkplaten. De bovenste helft is voor de conversie van de resterende stikstof. De ontwerpgegevens van de installatie zijn:

- een belasting van $7,1 \text{ kg N}^3 \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ reactor ($6,0 \text{ kg N} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$);
- verwijdering van ammonium en nitriet van minimaal 85%.

De reactor wordt van onder uit gevoed en het voedingsdebiet bedraagt gemiddeld circa $20 \text{ m}^3/\text{h}$. Om ophoping van materiaal in de reactor te voorkomen is het noodzakelijk dat de opstroomsnelheid voldoende is, circa 2-3 m/h. De vloeistofrecirculatie is daarvan afhankelijk. Het debiet van de gasrecirculatie is $70 \text{ Nm}^3/\text{h}$ (hierbij wordt circa 4 kW verbruikt).

4.2 VOORBEHANDELING

Tussen de Sharon en Anammox reactor wordt zwevende stof afgescheiden met behulp van een lamellenafscheider. Een afbeelding is gegeven in figuur 8. De functie van de lamellenafscheider is het voorkomen van de inspoeling van vaste stof. Dit is voornamelijk in de opstartperiode van essentieel belang om de biomassa retentie in de Anammox reactor hoog te houden. Het rendement voor de verwijdering van zwevende stof ligt tussen de 25 en 30%. Kleine en lichte deeltjes passeren de lamellenafscheider.

FIGUUR 8

LAMELLENAFSCHEIDER



Na de opstart is de lamellenafscheider volgens de leverancier niet meer van belang. Dit is getest door de afscheider enkele weken uit te schakelen. De werking van de Anammox reactor werd hierdoor niet negatief beïnvloed. Omdat de lamellenafscheider in Rotterdam onderdeel is van de installatie, wordt deze momenteel nog wel gebruikt.

Voorbehandeling is volgens de leverancier niet noodzakelijk, mits de concentratie zwevende stof in het centraat zodanig laag is dat voldoende biomassa-retentie in de reactor is gewaarborgd. Het is nog niet duidelijk wat de zwevende stof concentratie mag zijn in de opstartfase. Hierbij is tevens de samenstelling van het entmateriaal van belang. In overleg met de gebruiker kan daarom worden besloten geen voorbehandeling te installeren.

Het Waterschap verwijdert het opgehoopte slib in de lamellenafscheider eens per week of enkele weken. Deze staat dan uit voor een periode van circa 4 uur. De Anammox reactor krijgt dan geen voeding en wordt in recirculatie stand bedreven.

4.3 PROCESCONDITIES

Het ingaande elektrische geleidingsvermogen (EGV) is circa 4 mS/cm² het uitgaande EGV is circa 1,8 m S/cm². Binnen de volgende range van condities functioneert de reactor goed:

- T : 30 - 40 °C
- pH : 6,5 - 8
- NO₂-N : 2 - 40 mg/l (70 mg NO₂-N/l is een uiterste limiet).
- Ratio NH₄ : NO₂ : 1,1 - 1,4

In andere systemen (waarin slibvlokken in plaats van korrels worden toegepast) worden lagere nitrietconcentraties aangehouden, met een limiet van 10 mg NO₂⁻N/l.

4.4 PROCESMETINGEN EN REGELINGEN

Van de het ingaande afvalwater wordt het EGV, debiet en pH gemeten. De twee laatstgenoemde parameters zijn gekoppeld aan een CO₂ dosering voor eventuele pH correctie. Het verschil in EGV geeft een indicatie van de mate van conversie aan.

Het influentdebiet wordt geregeld op basis van de slibwateraanvoer en de waterhoogte in de Sharon, totdat er zich problemen (in de vorm van hoge nitrietgehalten) voordoen met de reactor. De aanvoer wordt in tijden van eventuele problemen of lage influentaanvoer naar de Sharon-reactor verlaagd. Bij afwezigheid van influent wordt alleen nog een recirculatiestroom over de reactor toegepast. De ingaande stromen worden gestuurd op een concentratie van 30 mg/l NO₂-N in de reactor, maar meestal zijn de actuele concentraties lager.

Daarnaast zijn er vier slibmonsterpunten verdeeld over de hoogte van de reactor. Het slib wordt regelmatig gecontroleerd op bezinkbaarheid met Imhoff glazen, afgebeeld in figuur 9. Er wordt niet gestuurd op basis van de bezinkbaarheid.

Het EGV en nitrietgehalte van het effluent worden on-line gemeten. Het EGV is een indicatie van het de ionenconcentratie. Indien de anammox omzetting optimaal functioneert, is het EGV laag. Indien ammonium en nitriet niet voldoende worden omgezet neemt het EGV toe.

De meting van EGV en nitriet is gekoppeld aan de influentpomp. Indien de bovengrenswaarde voor EGV en nitriet (70 mg/l) worden overschreden, zal de influentpomp aftoeren en uiteindelijk wordt gestopt. Op basis van de EGV meting kan de influentpomp weer automatisch aanschakelen, op basis van de nitrietmeting wordt dit niet gedaan. Eventueel wordt de opstart handmatig uitgevoerd. Dit laatste komt voornamelijk door de mogelijke storingsgevoeligheid van de nitrietmetingen, waardoor extra controle wenselijk wordt geacht.

De operators monitoren daarnaast de gasrecirculatie en alle procesomstandigheden. Vanwege de gevoeligheid zijn de operators verhoogd ingezet. Eenmaal per week maken de operators de bezinkers preventief schoon. Dit wordt gedaan door een gasdruk op de monsterpunten onder de bezinkers te zetten.

De handmatige metingen die worden verricht zijn:

- 3 x per week bezinkbaarheid met Imhoff glazen, daarnaast geeft de Imhoff van het effluent een indicatie van slibuitspoeling;
- indicatieve $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$ en $\text{NO}_3\text{-N}$ analyses (Dr. Lange) aan in- en effluent en in de reactor.

FIGUUR 9

ANAMMOX SLIB IN IMHOFF GLAS



4.5 OPSTART

Voorafgaand aan de realisatie van de anammox installatie is laboratoriumonderzoek uitgevoerd naar de toepassing van anammox in een SBR reactor op het rejectiewater van Sluisjesdijk²⁰. Hierbij werd een omzetting van circa $1 \text{ kg N.m}^{-3}.\text{d}^{-1}$ gerealiseerd. In navolgende proeven van Paques met een gasliftreactor werd beoogd korrelslib te krijgen. Met dit korrelslib werden nog hogere conversiesnelheden gehaald. Omdat de kosten van een pilot-installatie niet veel lager waren dan van een full-scale installatie heeft het waterschap besloten om direct een full-scale installatie te realiseren.

In 2002 is de Anammox reactor in bedrijf genomen. De opstartperiode was geschat op circa 2 jaar, maar de ontwerpspecificaties zijn pas gehaald in 2006. De lange duur van de opstartfase is voor een belangrijk deel het gevolg van de langzame reproductie van de anammox bacteriën, opschalingsfactoren, diverse processtoringsen en de inherente trage respons op maatregelen.

De opstart is uitgevoerd door enting met B-trap slib van rwzi Dokhaven. In tegenstelling tot korrelslib laat dit slib zich niet scheiden van inspoelend slib. De opstart verloopt sneller naarmate een langere sibleeftijd kan worden gehandhaafd. Tijdens de opstart van de eerste Anammox reactor was het plaatsen van een voorbehandeling daarom noodzakelijk. Pas na 70 dagen is de eerste groei van anammox bacteriën vastgesteld aan de hand van kwantitatieve meting van representatieve DNA fragmenten.

De stikstofconversie in deze periode was laag, na 535 dagen werd een gemiddelde conversie gemeten van $0,1 \text{ kg NH}_4\text{-N}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$. Om het aandeel anammox bacteriën te vergroten is verschillende malen entslib van Paques toegevoegd, in totaal 9 m^3 .

Na 848 dagen was de formatie van korrelslib een feit, en vanaf 900 dagen na de opstart wordt de Sharon bedrijfsvoering omgezet van nitritatie - denitrificatie naar alleen nitritatie. Na circa 3,5 jaar werd de ontwerpbelasting gehaald. De maximaal verkregen conversie was $9,5 \text{ kg N}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$, tegenover een ontwerp van $6,0 \text{ kg N}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$.

4.6 VERBRUIK VAN ENERGIE EN HULPSTOFFEN

4.6.1 ELEKTRICITEITSVERBRUIK

Het elektriciteitsverbruik van de Anammox reactor in Rotterdam wordt voornamelijk bepaald door de compressor en recirculatiepompen. Het opgenomen vermogen is 6 kW. Dit komt neer op een verbruik van circa 53.000 kWh/jaar.

4.6.2 WARMTE

De reactor is geïsoleerd en wordt indien nodig verwarmd met restwarmte van de warmtekracht-koppeling (WKK). De hoeveelheid wordt niet geregistreerd. Vanwege de beschikbaarheid van warmte wordt de reactor regelmatig op een temperatuur van $36 - 37 \text{ }^\circ\text{C}$ gebracht. Dit is echter niet noodzakelijk bij normale aanvoer. In principe hoeft aan de reactor geen warmte worden toegevoegd. De temperatuur van de Sharon reactor wordt door verwarming boven $30 \text{ }^\circ\text{C}$ gehouden. Anammox voegt nog enkele graden warmte toe, waarmee ondanks eventuele verliezen de temperatuur in deze reactor ook boven de $30 \text{ }^\circ\text{C}$ zal blijven.

4.6.3 CO₂

In de Anammox reactor wordt CO₂ gedoseerd in gasvorm om de pH lager dan 7 te houden. Boven deze pH ontstaat neerslag van grit in de vorm van calcium- of magnesiumfosfaat. Deze chemische slibproductie heeft een gloeirest van 80% en een negatieve invloed op de werking van de reactor. De gritkorrels zijn zo zwaar dat ze niet door de IC-reactor worden uitgespoeld. Het grit hoopt zich op in de reactor waardoor de sibleeftijd van de anammox bacteriën wordt verlaagd. Om de ophoping te controleren wordt eenmaal in de 8 weken circa 1 m^3 slib onderuit de reactor gespuid.

Het verbruik van CO₂ bedraagt $0,2 \text{ kg/kg N}$ belasting, circa 400 kg per week (dit is specifiek voor Sluisjesdijk). Zuurdosering blijkt nodig, omdat de bicarbonaatbuffer in de Sharon vergaand wordt gestript. In het geval van een traps Sharon-Anammox is zuurdosering waarschijnlijk niet nodig, omdat nitritatie en anammox in één reactor plaatsvinden.

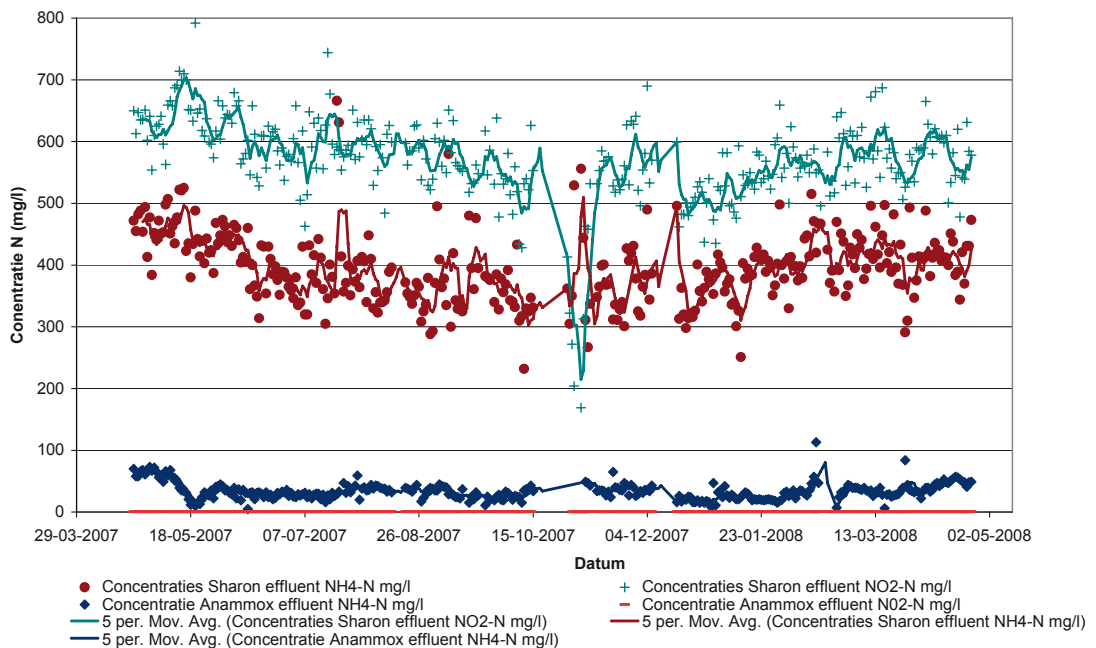
4.7 ZUIVERINGSRENDEMENTEN VAN HET SYSTEEM

In figuur 10 zijn de in- en uitgaande stikstofconcentraties gegeven van de Anammox tussen april 2007 en 2008 en daarbij zijn de voortschrijdende gemiddeldes van vijf dagen weergegeven. De ingaande concentratie ammonium varieert tussen de 300 en 550 mg/l de effluentconcentratie tussen de 20 en 50 mg/l.

De ingaande concentratie nitriet varieert tussen de 550 en 700 mg/l en de effluentconcentratie tussen de 2 en 20 mg/l. Het nitriet wordt dus bijna volledig verwijderd. De restconcentratie ammonium zou nog verlaagd kunnen worden door de optimalisatie van de verhouding tussen ammonium en nitriet.

De nitraatconcentratie in het effluent van de Anammox is gemiddeld 112 mg/l. Dit komt overeen met 10,7% van de ammoniumconcentratie in het influent van de Sharon. In de Anammox wordt dus 11% van de stikstof nog omgezet in nitraat. Dit is lager dan de 26% die eerder werd genoemd (zie reactievergelijking in § 2.2.2), omdat niet bij een maximale groeisnelheid wordt gewerkt en er ook denitrificatie van het nitraat optreedt.

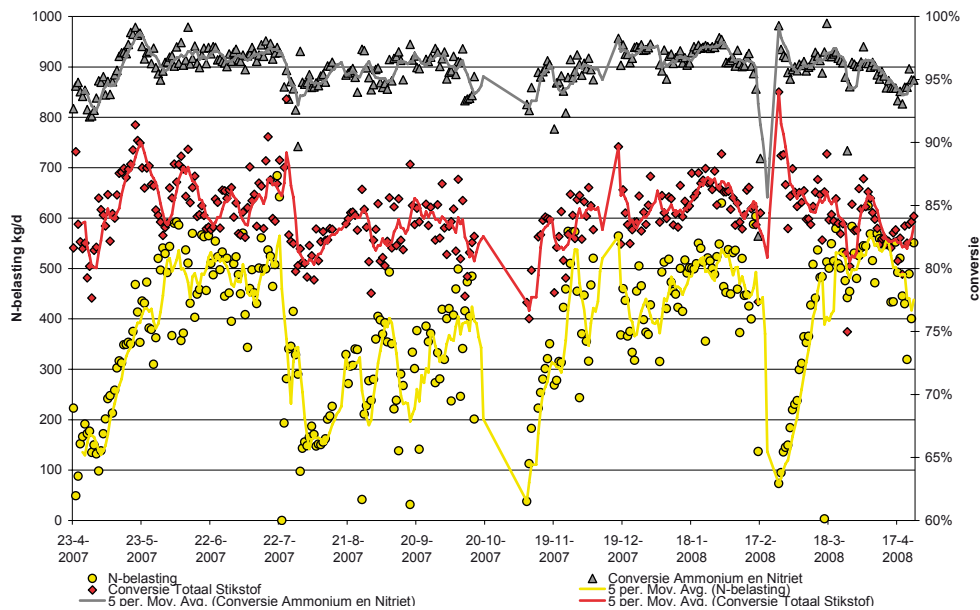
FIGUUR 10 CONCENTRATIE STIKSTOF IN- EN EFFLUENT VAN DE ANAMMOX REACTOR. "5 PER. MOV. AVG" BETEKENT VOORTSCHRIJDENDE GEMIDDELDE (MOVING AVERAGE) OVER VIJF WAARNEMINGEN



In figuur 11 is de stikstofbelasting en de stikstofconversies gegeven en het voortschrijdende gemiddelde over vijf dagen. De conversie van ammonium en nitriet op basis van de stikstofconcentratie in het influent van de Sharon is gemiddeld 96%. De N-totaal conversie van de combinatie van de twee processen is gemiddeld 84%. De N-belasting bij deze conversies is gemiddeld 390 kg N/d. De Anammox reactor is ontworpen op een N-belasting van 492 kg N/d, de maximale gemeten belasting was 684 kg N/d. De conversie van ammonium en nitriet was bij de maximale belasting 98% en de N-totaal conversie 87%. Het Waterschap heeft de indruk dat dit nog geoptimaliseerd kan worden.

FIGUUR 11

CONVERSIE EN N-BELASTING VAN DE ANAMMOX REACTOR. "5 PER. MOV. AVG" BETEKENT VOORTSCHRIJDENDE GEMIDDELDE (MOVING AVERAGE) OVER VIJF WAARNEMINGEN



4.8 BEDRIJFSZEKERHEID EN RISICO'S

Er hebben zich verschillende processtoringsen voorgedaan waardoor de activiteit van de anammox reactor daalde en de stikstofverwijdering afnam. Het resultaat van de storing is een hoge nitrietconcentratie in de afloop van de reactor. Er kan een onderscheid gemaakt worden tussen de storingsen in de aanloop fase en storingsen die inherent zijn aan het proces.

4.8.1 STORINGEN TIJDENS DE AANLOOP

De oorzaak en het bijbehorende gevolg van de problemen zijn:

- Vermindering van de stikstofconversie door vergiftiging van het slib door hoge concentraties nitriet.
- Uitspoeling van slibdeeltjes door wijzigingen in de hydraulische belasting.
- Bevriezing van de influentleidingen waardoor de aanvoer werd gestopt.
- Storingen in pompen en compressor waardoor er mengproblemen optraden.
- Doorslag van zwevende stof naar de reactor, waardoor de verblijftijd van de anammox bacteriën afnam (uitspoeling).
- Vanwege de controle van de bedrijfszekerheid van de Sharon is de methanol doseerinstallatie die uit bedrijf was genomen getest. In de test werd een overmaat aan methanol (> 100 mg/l) gedoseerd aan de Sharon. De methanol werd onvoldoende afgebroken en sloeg door naar de Anammox. Methanol is toxisch voor de anammox bacteriën bij concentraties van 30 - 40 mg/l. Overdosering van methanol is minder waarschijnlijk als op basis van een NO_2 -setpoint wordt geregeld.
- In eerste instantie werd er geen CO_2 gedoseerd en vormde de precipitatie van grit (calcium- of magnesiumfosfaat) een probleem.
- Daarnaast is het proces in 2003 een keer verstoord als gevolg van de directe verwerking door de gisting van afvalwater van stand-alone toiletten. Waarschijnlijk werd het proces verstoord door de bacteriologische remmers die worden gedoseerd in de toiletten.

4.8.2 STORINGEN INHERENT AAN DE ANAMMOX REACTOR TE SLUISJESDIJK

De storingen die inherent zijn aan de eerste Aammox reactor te Sluisjesdijk zijn:

- De bezinkers kunnen verstoppem waardoor er kortsluitstromen kunnen ontstaan. Daarnaast is de gasrecirculatie dan niet meer volledig en kan een gedeelte van de reactor niet goed gemengd meer worden.
- In de recirculatiestroom van het stikstofgas kan zuurstofinslag optreden indien de druk wegvallt. De operators kunnen het aanzuigen van lucht waarnemen aan de “klepperende” terugslagklep. De zuurstof zorgt voor aërobe condities waardoor de anammox bacteriën slecht functioneren. Dit probleem heeft zich drie keer voorgedaan. Het systeem is met een alarmering op basis van nitrietmeting aangepast. Kortstondige blootstelling aan zuurstof bij bijvoorbeeld de opstart is echter geen probleem. Er is vastgesteld^{21,22} dat de anammox bacteriën een half uur blootgesteld kunnen worden aan zuurstofconcentratie van 2 - 3 mg/l zonder enig verlies aan conversiecapaciteit.
- Tenslotte zijn er een aantal aandachtspunten die van invloed kunnen zijn op het anammox proces:
 - behandeling van extern slib (een groot aandeel extern slib, dat bij een lagere temperatuur wordt ontwaterd, kan tot lage influenttemperaturen leiden en verwarming noodzakelijk maken);
 - extern afvalwater;

Normaliter kan de reactor na stilstand de volgende dag direct worden herstart. Het Waterschap heeft een overeenkomst met Waterstromen (dochteronderneming van Waterschap Rijn en IJssel) in verband met de levering van anammox slib. Bij Waterstromen zijn twee anammox installaties operationeel (in Olburgen en Lichtenvoorde). In geval van calamiteiten met het anammox slib kan zo de periode dat de reactor buiten bedrijf is worden geminimaliseerd. Er is door het Waterschap in totaal drie maal gebruik gemaakt van entslib.

Echter een continue slibopslag ten behoeve van het opvangen van een calamiteit is niet aan de orde vanwege de hoge kosten (opslag installatie en dosering natriumnitrat) en afnemende activiteit van het slib. Dit laatste wordt versterkt door de anaërobe omstandigheden gedurende opslag.

4.9 OPERATIONELE EN INVESTERINGSKOSTEN

De investeringskosten voor een gecombineerde nitritatie - anammox deelstroombehandeling van 300 kg N/d, bedragen naar schatting circa € 1,1 -1,2 miljoen (in groene weide situatie).

De operationele kosten bestaan verder uit:

- personeelskosten, er is 4 uur per dag iemand beschikbaar voor de gecombineerde installatie. Hiervan is 2,5 uur nodig voor de Anammox. Deze inzet kan nog worden geoptimaliseerd. De werkzaamheden die worden uitgevoerd zijn voornamelijk het registreren en controleren van de procesparameters teneinde processtoringen te voorkomen of snel te verhelpen. De bedrijfsvoering is 7 dagen per week wenselijk, maar kan naar verwachting nog worden verlaagd door verdergaande automatisering. De huidige tijdsbesteding komt neer op circa 913 uur per jaar. De personeelskosten zijn bij een uurtarief van € 50,- jaarlijks € 45.700,-

- Het energieverbruik is circa 105.120 kWh per jaar. Met een energieprijis van € 0,12 / kWh komt dit overeen met € 12.615,- per jaar
- De kosten voor eindverwerking van het spuislib en grit zijn gering en bij benadering voor 5 m³/jaar circa € 450,- per jaar.

Er zijn geen kosten opgenomen voor entslib. Tot nu toe diende het Waterschap alleen de transportkosten te betalen. De waarde van entslib in de toekomst is vooralsnog onbekend.

5

EINDEVALUATIE

DEELSTROOMBEHANDELING SLUISJESDIJK

In dit hoofdstuk wordt het toepassen van de afzonderlijke en gecombineerde processen vergeleken.

5.1 COMBINATIE SHARON-ANAMMOX

ZUIVERINGSRENDEMENT

De stikstofverwijdering van het gecombineerde proces functioneert boven verwachtingen. De ontwerpbelasting is overtroffen en de verwijdering van totaalstikstof bedroeg 84%.

Incidenteel komt het rendement in gevaar door processtoringen, echter dit heeft nog geen directe negatieve gevolgen voor het functioneren van de rwzi Dokhaven en het behalen van het gebiedsrendement voor N-verwijdering.

BEDRIJFSVOERINGSASPECTEN

Robuustheid en risico's

Uit de resultaten mag geconcludeerd worden dat het systeem redelijk robuust functioneert en dat de ontwerpspecificaties ruimschoots worden gehaald. De lage groeisnelheid van de anammox bacteriën maakt het risico voor een langere verstoorde periode groter. Risico is per definitie de combinatie van frequentie van uitval en de maat van effect. In dit opzicht is het regelmatig voorgekomen dat er storingen plaatsvonden. Deze storingen hadden een aanzienlijk effect op het functioneren van de reactor. Dit stelt dus hoge eisen aan meting en regeling van het systeem.

Ervaringen operators

In het kader van de bedrijfsvoering is aan de operators en gevraagd hoe ze het systeem zouden beoordelen en karakteriseren. De bedrijfsvoering van de Sharon reactor in het gecombineerde proces wordt als niet ingewikkeld en beheersbaar beoordeeld. Dit in tegenstelling tot de meer complexe bedrijfsvoering van de Sharon ingezet als volledige stikstofverwijderingsproces. De afstemming van de doseringen van methanol en de beheersbaarheid/sturing hiervan maakten het ingewikkelder. In nieuwere Sharon-installaties is dit proces geautomatiseerd op basis van een NO_x-meting.

De bedrijfsvoering van de Anammox reactor wordt wel als complex ervaren. De operators zijn elke dag het systeem aan het monitoren om procesverstoringen vroegtijdig te signaleren, zodat ze accuraat en op korte termijn maatregelen kunnen treffen. De gevoeligheid van de

anammox bacteriën zorgt er automatisch voor dat de operators een grote verantwoordelijkheid krijgen. De zorg voor de reactor kan in vergelijking met andere processen bij aanvang als hoger worden beschouwd.

TOEPASBAARHEID ELDERS

Naast de bedrijfsvoeringsaspecten is ook geïnformeerd of het waterschap het systeem zou aanbevelen aan andere waterbeheerders. Het waterschap heeft aangegeven dat de toepasbaarheid van het proces afhangt van de beperkingen, tekort aan nitrificatiecapaciteit of denitrificatiecapaciteit, van de rwzi en het aandeel BZV/N in het rejectiewater. Introductie van een deelstroombehandeling is te overwegen indien er sprake is van een beperking in de reactorruimte en zuurstofaanbod.

VAN TWEETRAPS NAAR EENTRAPSSYSTEEM

Grontmij en Paques hebben beide te kennen gegeven op basis van kennis en inzicht in de kosten meer vertrouwen te hebben in een eentrapssysteem. Op basis van de vergelijking in deze studie wordt geconcludeerd dat de voorkeur uit gaat naar een eentrapssysteem vanwege de verminderde complexiteit, de geringere kosten en het potentieel geringere verbruik van chemicaliën. Het optreden van precipitatie in de reactor is een aandachtspunt, de korrelreactor is hiervoor gevoeliger omdat het grit ophoopt in de reactor.

6

HANDREIKING KEUZE EN ONTWERP

In dit hoofdstuk wordt een handreiking gegeven voor het ontwerp van een deelstroombehandeling met een Anammox systeem. In eerste instantie worden de randvoorwaarden voor een dergelijk systeem gegeven. Daarna komen ontwerp- en beheersaspecten aan bod.

6.1 DEELSTROOMBEHANDELING: GEWENST OF NIET?

6.1.1 RANDVOORWAARDEN

Een eerste randvoorwaarde voor het opnemen van deelstroombehandeling in een zuiverings-schema is de aanwezigheid van een deelstroom! Deze deelstroom dient een aanmerkelijke hoeveelheid en concentratie stikstof te bevatten. Dit betekent dat slibgisting aanwezig dient te zijn, in combinatie met slibontwatering. Slibgisting is alleen kosteneffectief vanaf een zekere schaalgrootte, vanaf ongeveer 150.000 tot 200.000 i.e. (à 136 gram TZV).²³ Uit duurzaamheidsoverwegingen hoeft de toepassing van slibgisting niet per se kosteneffectief te zijn, ook energie-effectiviteit kan het doel zijn. Dit laatste lijkt alleen zinvol als de extra kosten van de gewonnen energie niet excessief hoog zijn.

De kosteneffectiviteit van slibgisting wordt bepaald door aan de ene kant de opbrengst uit energieopwekking en de verminderde kosten van de eindverwerking van het slib door de reductie van de slibhoeveelheid; aan de andere kant staan de investerings- en de bedrijfsvoeringskosten van de slibgisting, plus de kosten van de verwijdering van de bij vergisting vrijgekomen fosfor en stikstof. Voor de behandeling van de vrijgekomen stikstof staat teruggoed naar de oorspronkelijke rwzi of behandeling in een deelstroom ter beschikking.

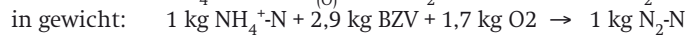
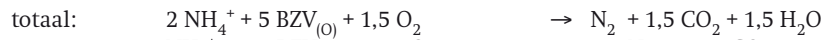
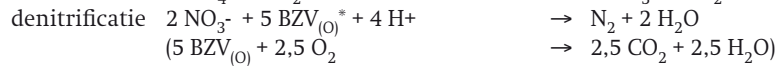
6.1.2 ENERGIEVERBRUIK BIJ DEELSTROOMBEHANDELING

In deze paragraaf wordt het energieverbruik voor stikstofverwijdering in de hoofdstroom en deelstroom met elkaar vergeleken. Het energieverbruik wordt grotendeels bepaald door de benodigde hoeveelheid zuurstof. In het navolgende kader zijn de reactievergelijkingen voor de N-verwijdering gegeven.

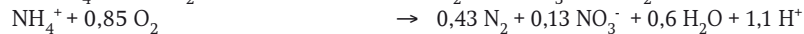
In de hoofdstroom vinden nitrificatie en denitrificatie plaats. In de nitrificatiestap wordt zuurstof verbruikt, in de denitrificatiestap wordt nitraat met BZV omgezet. Het verbruik aan BZV wordt beschouwd als een besparing op de benodigde hoeveelheid zuurstof (dat anders noodzakelijk zou zijn om de BZV te verwijderen). In de deelstroombehandeling wordt zuurstof verbruikt in de nitrificatiestap.

In een situatie zonder tekort aan BZV is het energetische verschil tussen verwerking in de hoofdstroom en in de deelstroom niet zo heel groot. Voor omzetting van 1 kg N is in de hoofdstroom ($5 / 2 \times 16 / 14 =$) 2,9 kg BZV en ($0,75 \times 32 / 14 =$) 1,7 kg O₂ nodig, en in een gecombineerd nitrificatie - anammox proces 0 kg BZV en ($0,85 \times 32 / 14 =$) 1,9 kg O₂.

hoofdstroom:



deelstroom (vereenvoudigd, zie reactievergelijking in § 2.2.2: in het totaal wordt de nitritatie-reactie vermenigvuldigd met 1,3 en de anammoxreactie met 1:



* BZV_(o) is BZV uitgedrukt in mol zuurstof O; bijvoorbeeld voor glucose:



De winst van de toepassing van deelstroombehandeling in een nitritatie - anammox proces zit dus niet in de besparing op de hoeveelheid zuurstof, maar op de hoeveelheid BZV die nodig is voor de omzetting. Als de BZV niet beschikbaar is, dan moet deze worden aangeschaft, en dat kan duur zijn.

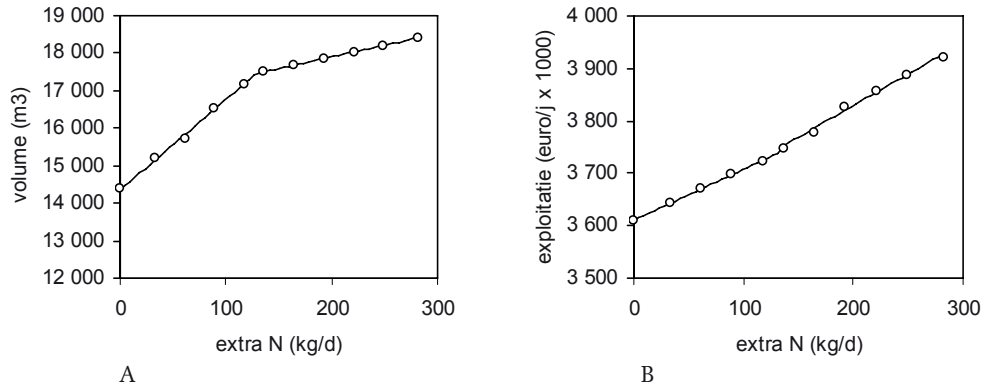
6.1.3 RUIMTEGEBRUIK EN KOSTEN

Een ander aspect is de besparing in de hoeveelheid reactorruimte. Met de marginale inspanningen kan de N-verwijdering in de hoofdstroom en deelstroom met elkaar worden vergeleken. Enige berekeningen zijn weergegeven in figuur 12. Hierbij zijn marginale inspanningen (zoals reactorruimte en kosten) berekend. Dat zijn de extra inspanningen als gevolg van *extra* stikstof. Deze zijn te berekenen door de exploitatiekosten van een rwzi te berekenen. De berekening is gemaakt met de volgende uitgangspunten voor het prijspeil 2008:

- een rente van 6%
- en afschrijvingstermijnen van 30 jaar voor civiele werken en 15 jaar voor niet-civiele,
- kosten voor energie van € 0,09 per kWh en
- voor externe C-bron van € 0,40 per kg CZV.

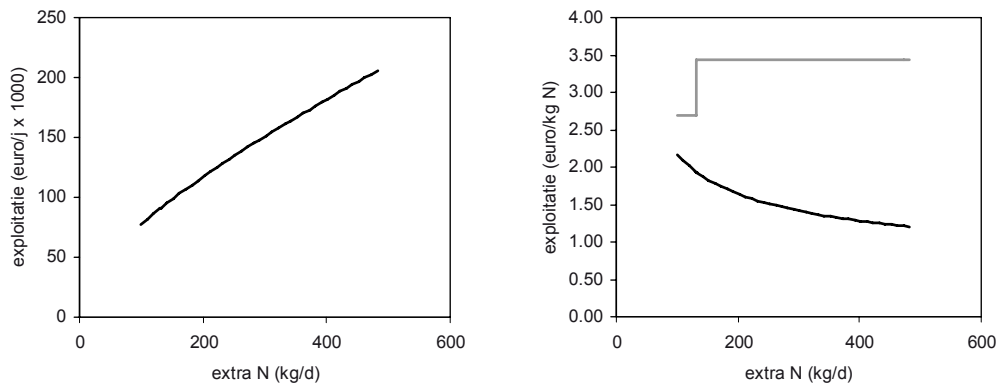
De marginale behoefte aan reactorruimte, berekend op de wijze zoals eerder is gepresenteerd²³ bedraagt circa 24 m³ reactorruimte per kg N/d aan extra stikstof; dit is te zien in figuur 12. Voor een installatie van 100.000 i.e. bedragen de marginale kosten (de *extra* kosten voor de verwerking van *extra* stikstof) 2,70 per kg N tot circa 130 kg N/d extra, daarboven circa 3,40 per kg N.

FIGUUR 12 BEHANDELING VAN EXTRA STIKSTOF. A: HET VOLUME VAN DE BELUCHTE RUIMTE ALS FUNCTIE VAN DE HOEVEELHEID EXTRA STIKSTOF BIJ EEN RWZI VAN 100.000 I.E. EN B: DE EXPLOITATIE VAN DE ZUIVERING ALS FUNCTIE VAN DE EXTRA STIKSTOF. DE KNIK IN DE CURVES WORDT VEROORZAAKT DOORDAT DOSERING VAN EEN C-BRON VANAF EEN BEPAALDE MAXIMUM DENITRIFICATIERUIMTE (HIER 70%) NOODZAKELIJK IS



De kosten van de behandeling in een deelstroombehandeling, bestaande uit een eentraps nitritatie-anammox behandeling, zijn aan de hand van prijsopgave van leveranciers, geschat. Voorts is bij de berekening uitgegaan van dezelfde uitgangspunten voor de berekening van de kapitaalslasten als boven, en zijn energiekosten, slibverwerkingskosten en personeel inbegrepen. Een en ander is geïllustreerd in figuur 13.

FIGUUR 13 BEHANDELING VAN STIKSTOF IN EEN EENTRAPS NITRITATIE-ANAMMOX REACTOR, ALS FUNCTIE VAN DE VRACHT. LINKS: TOTALE EXPLOITATIEKOSTEN; RECHTS: EXPLOITATIEKOSTEN PER KG N. IN DE RECHTERFIGUUR ZIJN OOK DE MARGINALE KOSTEN VAN BEHANDELING IN DE HOOFDSTROOM OPGENOMEN (GRIJZE CURVE, ONTLEENT AAN FIGUUR 12B)



Uit de berekeningen blijken exploitatiekosten, afhankelijk van de capaciteit van de installatie, van circa € 1,20 tot € 2,10 per kg N. Uit het voorgaande blijkt dat de marginale kosten van N-verwijdering duidelijk lager zijn dan in de hoofdstroom.

6.1.4 GROENE WEIDE

Uit de boven gegeven uitkomsten komt naar voren dat bij een schaalgrootte die voldoende groot is om slibgisting te rechtvaardigen, het toepassen van deelstroombehandeling in een nitritatie - anammox combinatie in een nieuw te bouwen installatie vrijwel altijd zin heeft. Alleen bij een schaal kleiner dan circa 60 kg N/d (in rejectiewater) is behandeling in de hoofdstroom efficiënter. Bij een dergelijke schaal is slibgisting echter niet interessant.

6.1.5 EXTERN SLIB

Slibgisting kan ook effectief zijn bij geringere schaalgrootte als extern slib, dat wil zeggen slib afkomstig van andere zuiveringsinstallaties, wordt verwerkt. Ook als er sprake is van zogenaamde co-vergisting, het meevergisten van materialen die niet uit rwzi's afkomstig zijn, kan slibgisting interessant zijn. Uit figuur 12 en 13 wordt duidelijk dat in dergelijke situaties deelstroombehandeling zin heeft zodra meer dan circa 120 kg N/d behandeld moet worden. Bij behandeling van extern slib neemt de BZV/N-verhouding van het influent (inclusief rejectiewater) in de hoofdzuivering af.

6.1.6 BESTAANDE SITUATIES

In een bestaande situatie dient, als er een retourstroom bijkomt die veel extra N bevat, óf een aanzienlijke hoeveelheid biologische ruimte te worden bijgebouwd, óf een aanzienlijke hoeveelheid C-bron te worden gedoseerd, en mogelijk allebei. Het bijbouwen van biologische ruimte is natuurlijk aanzienlijk kostbaarder dan de marginale kosten die zijn berekend voor een groene weide situatie zoals gepresenteerd in figuur 12. De kosten voor dosering van een C-bron zullen aan de andere kant bij benadering dezelfde zijn als in de marginale kostenberekening gepresenteerd in figuur 12 (rechterdeel van de curve).

6.2 ONTWERPASPECTEN VAN DEELSTROOMBEHANDELING

De ontwerpgrondslagen die in tabel 3 worden gepresenteerd zijn alleen bedoeld ter indicatie. De grondslagen kunnen aan de hand van de verkregen informatie als volgt worden geformuleerd:

TABEL 3 ONTWERPGRONDSLAGEN

Parameter	Eenheid	Bestaand		Groene Weide	
		tweetraps systeem	Ééntraps-Anammox	Demon	
Buffer verblijftijd	uur	A (bij uitvoering als Sharon is de sharon tank beschikbaar als buffer)	A		6 - 8
Hydraulische verblijftijd	uur	A (1-1,5 dag voor nitrificatie in de Sharon)	A		A
Belasting	kg N.m ⁻³ .d ⁻¹	7 (voor de anammox)	2		0,6
Slibgehalte	g/l	-	-		5
Slibleeftijd	d	> 20	> 20		20 - 30
SVI	ml/g	-	-		< 100
Zuurstofverbruik	kg O ₂ /kg N	circa 2	circa 2		circa 2
Energiebehoefte	kWh / kg N	1,3	1,0		1,0
CO ₂ verbruik*	kg CO ₂ /kg N	W	W		W

A : afhankelijk van specificaties W : afhankelijk van afvalwatersamenstelling * : CO₂-verbruik voor pH-correctie

6.3 BEHEERSASPECTEN

Beheersaspecten die aandacht verdienen zijn de volgende:

- De gewenste metingen in een Sharon-deel van een Sharon-Anammox installatie zijn de aërobe verblijftijd, zuurstofgehalte en temperatuur. In het anammox deel dienen nitriet, temperatuur, zuurstof en pH gemeten te worden. Het EGV zou als alternatief kunnen dienen voor nitrietmeting; eventueel kunnen beiden naast elkaar worden gemeten.
- Het is aan te bevelen om regelmatig de slibkarakteristieken te analyseren, zodat de slibsamenstelling (aandeel anammox), structuur (vlokken of korrels) en mogelijke precipitaatvorming inzichtelijk is.
- Het is aan te bevelen om zoveel mogelijk regelingen te automatiseren, en de procescondities inzichtelijk te maken middels een besturingssysteem.
- Voor onderhoud dient voorlopig te worden uitgegaan van minimaal vier uur per week.
- Tenslotte kunnen eventuele slibcalamiteiten (verliezen van korrelslib) worden opgevangen door afspraken te maken voor uitwisseling van slib tussen bestaande Anammox-installaties.

7

TOEKOMSTIGE SYSTEMEN VOOR N-VERWIJDERING

Het is recentelijk aangetoond dat N-verwijdering op praktijkschaal in een deelstroombehandeling goed kan plaatsvinden in twee reactoren. Daarnaast is het ook mogelijk om de N-verwijdering te laten plaatsvinden in een één-reactor systeem zoals één-reactor biofilmsystemen en zelfs SBR reactoren. De toepassing van anammox bacteriën is in nog in een sterke ontwikkeling. Momenteel zijn er circa 35 universiteiten in verschillende landen (bijvoorbeeld in Nederland, Zwitserland, Duitsland USA, Japan, China etc.) waar onderzoek wordt uitgevoerd naar het anammox proces. Door Van der Star *et al*¹⁸ is een overzicht gegeven van de verschillende reactorsystemen die recentelijk mogelijk zijn. In onderstaande tabel 4 zijn de systemen genoemd.

TABEL 4 SYSTEMEN VOOR TOEPASSINGEN VAN ANAMMOX BACTERIËN

naam proces	aantal reactoren	bron van nitriet	alternatieve naam
tweetraps nitritatie-anammox	2	ammonium nitritatie	SHARON®-ANAMMOX®, 2-traps Oland 2-traps deammonificatie
eentraps nitritatie-anammox	1	ammonium nitritatie	aërobe deammonificatie, Oland, One-step-Anammox®, Canon, deammonificatie, SNAP Demon®, Dib
eentraps denitrificatie - anammox	1	nitraat denitrificatie	anammox, deamox, denammox

7.1 EENTRAPS NITRITATIE - ANAMMOX SYSTEMEN

Het slibbedrijf te Sluisjesdijk had de eerste full-scale Anammox reactor, en tevens het eerste gecombineerde tweetraps nitritatie - anammox systeem. De nitritatie - anammox combinatie kan ook in één reactor plaatsvinden. Op het moment van realisatie van Rotterdam bevond deze ontwikkeling zich nog in het laboratoriumstadium. Inmiddels draait in Olburgen sinds 2006 de eerste Nederlandse full-scale One-step-Anammox® reactor (éentraps nitritatie - anammox proces) succesvol op het afvalwater van een aardappelverwerkende industrie. Een Demon systeem (eveneens nitritatie - anammox) werd in 2004 opgestart en werd in 2005 volgens ontwerp belast²⁵. Hiervan zijn inmiddels meerdere systemen operationeel.

Met het eentraps proces is het gebruik van de anammox omzetting vereenvoudigd. De hoeveelheid hardware is sterk gereduceerd en het gebruiksgemak is vergroot. Het scheelt namelijk pompen en capaciteit van de compressor. Het proces is simpeler en makkelijker te bedrijven. Voor toekomstige projecten zal daarom zeker de eentraps variant worden geadviseerd.

Indien een eentraps nitritatie - anammox installatie in Rotterdam zou zijn gerealiseerd zou de rejectiewaterbehandeling bestaan uit één reactor van 300 m³ (type ééntraps gecombineerde nitritatie, - anammox in een gasliftreactor) in vergelijking met ruim 1.800 m³ van beide reactoren nu (de Sharon-reactor is gebouwd in een bestaande tank, en dientengevolge overgedimensioneerd). Op de eentraps nitritatie - anammox reactor is naar verwachting minder zuurdosering nodig. Bovendien is het energieverbruik van de eentrapsvariant beduidend lager.

Het verwijderingsrendement uitgedrukt in N-totaal van het één-traps-anammox proces is 85%. Het NH₄-N rendement is 98%. Het energieverbruik van dit systeem is circa 1 kWh/ kg N. Indien de temperatuur van het rejectiewater boven de 25 °C is, hoeft het water volgens Paques niet opgewarmd te worden, door de eigen warmteproductie van het systeem. Dit hangt natuurlijk van de ammoniumconcentratie af (500-1.000 mg/l). De slibproductie van het systeem is vrijwel nihil.

7.2 SYSTEEMVERGELIJKING

In tabel 5 is een overzicht gegeven van de anammox installaties die momenteel in onderzoek zijn of zijn gerealiseerd. De tabel is samengesteld op basis van onderzoek en literatuuroverzichten uit twee proefschriften^{24, 26}. Uit de tabel valt af te leiden dat de maximale volumetrische N-conversiesnelheid aardig kan verschillen per proces en medium. De korrelreactor die ingezet wordt als onderdeel van een tweetrapssysteem heeft de hoogste conversiesnelheid van 10 kg N.m⁻³.d⁻¹. Indien de korrelreactor in een ééntrapssysteem wordt uitgevoerd is de conversiesnelheid lager, circa 2 kg N.m⁻³.d⁻¹.

Het ruimtebeslag van de installatie is bij een korrelreactor, ook vanwege de hoge bouw, lager dan een biofilm- of slibsysteem. De korrelslibreactor is ongevoeliger voor zwevende stof in het influent, in een SBR neemt de slibleeftijd door inspoelende zwevende stof namelijk af. De bedrijfsvoering van een korrelslibreactor is wel complexer dan een SBR. Het gebruik van IC-achtige reactoren met de tussenbezinking heeft laten zien dat het gevoeliger is voor verstoppingen.

TABEL 5 OVERZICHT VAN EEN AANTAL ANAMMOX INSTALLATIES (NMAX: MAXIMALE N-CONVERSIE IS UITGEDRUKT IN KG N M⁻³ D⁻¹)

Proces	Medium	Schaal	Influent	Nmax	Referentie
BAF (biological aerated filter)	Lava	Lab	Synthetisch	nb.	25
Vastbed reactor	Glas biofilm	Lab	Synthetisch	1,1	25
	FBR 1 PVC biofilm 250 m ² .m ⁻³	Lab	Synthetisch met effluent van	0,35	25
	FBR 2 PVC biofilm 250 m ² .m ⁻³		partiële nitrificatie	0,38	
	FBR 3 PP biofilm 90 m ² .m ⁻³			0,35	
Anammox Process					
Korrelreactor	Korrelslib	Praktijk	Rejectiewater	10	23
Korrelreactor	Korrelslib	Praktijk	Afvalwater leerlooierij	1	23
Moving bed	Slib	Praktijk	Rejectiewater	1	23
Korrelreactor	Korrelslib			3	23
Korrelreactor	Korrelslib	Lab	Synthetisch	4	23
Moving bed		Pilot	Rejectiewater	0,1	23
SBR	Slib	Pilot	Rejectiewater	2	23
One-reactor nitrification – anammox reactor					
Bellenkolom		Praktijk	Vergist aardappel afvalwater	1,2	23
SBR		Praktijk	Rejectiewater	0,6	23
SBR		Praktijk	Rejectiewater	0,4	23
Rotating Disc Contactor (RDC)	Biofilm	Praktijk	Percolaat	1,7	23
Moving bed		Praktijk	Rejectiewater	1	23
RDC	Biofilm	Praktijk	Percolaat	0,6	23
RDC	Biofilm	Praktijk	Percolaat	0,4	23
Moving Bed	Biofilm (Kaldness ringen)	Pilot	Rejectiewater	0,5	23
Fluid bed	Zand / Biofilm	Lab	Synthetisch	1,8	
Fluid bed	Zand / Biofilm	Lab	Rejectiewater	1,5	26
Fluid bed	Zand / Biofilm	Lab	Synthetisch / slib	5,1	26
Fluid bed	Zand / Biofilm	Praktijk	Bakkersgist afvalwater	1,5	26
SBR	Korrels	Pilot	Gedeeltelijk Sharon effluent	0,75	26
SBR	Actief slib	Pilot	Gedeeltelijk nitrificatie effluent	0,8 – 0,9	26
SBR	Actief slib en zeoliet drager materiaal	Lab	Synthetisch	0,05- 0,13	26
Membrane assisted bioreactor	Actief slib in SBR	Lab	Synthetisch	0,1	26
Upflow reactor	Korrelslib	Pilot	Synthetisch Synthetisch	2,9	26
		Lab		6,4	
Gas lift reactor	Korrelslib	Lab	Synthetisch	8,9	26
UASB	Korrelslib	Lab	Varkensafvalwater	0,7	26
UASB	Korrelslib	Lab	Effluent papierfabriek	0,14	26
Upflow reactor	Korrelslib	Lab	Varkensafvalwater	0,72	26

7.3 EMISSIE VAN STIKSTOFOXIDEN

Een interessant aspect van de toepassing van één of twee reactoren is de emissie van stikstofoxiden. De emissie van NO en N₂O wordt mede beïnvloed door hoge concentraties nitriet of lage concentraties zuurstof tijdens de nitrificatie. Bij een gescheiden nitrificatie en anammox reactor komen hoge concentraties nitriet voor in de nitrificatiereactor wat de kans op de emissie van NO en N₂O verhoogt. Daarentegen wordt in een ééntrapssysteem het nitriet direct omgezet, wat kan inhouden dat de emissie van NO en N₂O minder is dan in een tweetraps-systeem. Echter in een ééntrapssysteem is het door de aanwezigheid van anammox bacteriën

van belang dat de zuurstof concentraties in de biofilm laag zijn. Lage zuurstofconcentraties kunnen tot een verhoogde emissie van NO en N₂O leiden²⁷. Er is op basis van de beschikbare gegevens omtrent de N₂O-emissie geen onderscheid te maken tussen N-verwijdering in hoofdstroom, of deelstroom, en ook niet tussen één- en tweetrapsdeelstrtoombehandeling.

7.4 ENGERIEDUCTIE

In het een recent artikel²¹ (2008) wordt het anammox proces beschouwd als een technologie waarmee de bedrijfsvoering van een rwzi in hoge mate zelfvoorzienend ('autarkisch') kan zijn met betrekking tot energie. Overigens was hier eerder ook al aandacht aan besteed²⁸. De strekking in het artikel is dat er zoveel mogelijk primair slib dient te worden afgevangen met behulp van pre-precipitatie in de voorbezinktank teneinde dit slib te vergisten voor de productie van biogas, alsmede groene stroom. De stikstofverwijdering zou dan gedeeltelijk plaatsvinden in de waterlijn en in de sliblijn met behulp van een anammox proces. Door de implementatie van het anammox proces wordt de benodigde denitrificatiecapaciteit met 25% verlaagd.

Uit controleberekeningen blijkt dat de zelfvoorzienendheid ook bij toepassing van anammox niet gerealiseerd kan worden, maar dat het energieverbruik wel aardig afneemt. Het netto energieverbruik in een systeem met voorbezinking en slibgisting neemt bij toepassing van pre-precipitatie en deelstroombehandeling wel af met circa 50 - 60% ten opzichte van een systeem zonder deelstroombehandeling en pre-precipitatie. Dit wordt voor een belangrijk deel veroorzaakt door de pre-precipitatie, die de hoeveelheid beluchtingsenergie vermindert, en de hoeveelheid energiewinst bij de slibgisting vergroot.

8

REFERENTIES

- 1 STOWA 2004. Rejectiewaterbehandeling geëvalueerd: Sharon: effluentkwaliteit, alternatieven en marktpotentie. STOWA, Utrecht, rapport 2004-20.
- 2 Commissie Integraal Waterbeheer 1999. Financiering Zuiveringsbeheer –Voorstel voor een nieuwe heffingsmaatstaf en bouwsteen in de discussie rond de financiering van het waterbeheer. CIW, Den Haag, 1999.
- 3 Bron: 350 000 ton in 2001 - 2003 volgens CBS, 70 - 75 % daarvan vergist, en vergisting reduceert droge stof met 30%.
- 4 STOWA 2000. Het gecombineerde Sharon/Anammoxproces; Een duurzame methode voor N-verwijdering uit slibgistingwater. STOWA, Utrecht, rapport 2000-25.
- 5 STOWA 1996. Behandeling van stikstofrijke stromen op rioolwaterzuiveringsinrichtingen – Enkelvoudig reactorsysteem voor ammoniumverwijdering via nitriet. STOWA Utrecht, rapport 96-01.
- 6 STOWA 1995. Behandeling van stikstofrijke retourstromen op rioolwaterzuiveringsinrichtingen – Praktijkonderzoek met de membraanbioreactor naar nitrificatie/denitrificatie via nitriet bij slibverwerkingsbedrijf Sluisjesdijk. STOWA, Utrecht, rapport 1995-15.
- 7 Hellinga C, A A J C Schellen, J-W Mulder, M C M van Loosdrecht & J J Heijnen 1998. The Sharon process: an innovative method for nitrogen removal from ammonium-rich waste water. *Water Science & Technology* 37 (9): 135-142.
- 8 Mulder, J W, J O J Duin, J Goverde, W G Poiesz, H M van Veldhuizen, R van Kempen & P Roeleveld 2007. Full-scale experience with the Sharon process through the eyes of the operators. *Weftec 2006*: 5256 - 5270.
- 9 Mulder A 1989. Anoxic ammonia oxidation of wastewater. European Patent Ep327184. Assignee: Gist-Brocades NV, NL.
- 10 Strous M, J J Heijnen, J G Kuenen & M S M Jetten. 1998. The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms. *Appl Microbiol Biotechnol* 50(5) 589-596.
- 11 van Loosdrecht M. Persoonlijke mededeling.
- 12 STOWA 1996. Verwijdering van ammonium uit slibgistingwater met het Anammox-proces; haalbaarheidsstudie. STOWA, Utrecht, rapport 1996-21.
- 13 Abma W, persoonlijke mededeling (in litt)

- 14 Sliekers A O, N Derwort, J L Campos Gomez, M Strous, G J Kuenen & M S M Jetten 2002. Completely autotrophic nitrogen removal over nitrite in one single reactor. *Water Research* 36: 2475-2485.
- 15 Third K A, A O Sliekers, J G Kuenen & M S Jetten 2004. The CANON system (Completely Autotrophic Nitrogen-removal Over Nitrite) under ammonium limitation: interaction and competition between three groups of bacteria. *Syst Applied Microbiology* 4: 588-596.
- 16 Waterschap Hollandse Delta 2004. Milieujaarverslag 2004 awzi Dokhaven/ slibverwerkingsbedrijf Sluisjesdijk. Overheidsverslag. Waterschap Hollandse Delta.
- 17 J W Mulder, Waterschap Hollandse Delta, persoonlijke mededeling
- 18 M C M van Loosdrecht, persoonlijke mededeling
- 19 van der Star W R L, W R. Abma, D Blommers, J-W Mulder, Takaaki Tokutomi, M Strous, C Picioreanu, M C.M. van Loosdrecht. Startup of reactors for anoxic ammonium oxidation: Experiences from the first full-scale anammox reactor in Rotterdam. *Water Research* 41: 4149 – 4163.
- 20 Dongen U van, M S N Jetten & M C M van Loosdrecht 2001. the Sharon - Anammox process for treatment of ammonium-rich wastewater.
- 21 Siegrist H, D Salzgeber, J Eugster & A Jass 2008. Anammox brings WWTP closer to energy autarky due to increased biogas production and reduced aeration energy for N-removal. *Water Science and Technology* 57 (3): 383 - 388.
- 22 Strous M., E van Gerven, J G Kuenen, M S M Jetten 1997. Effects of aerobic and microaerobic conditions on anaerobic ammonium-oxidizing (anammox) sludge. *Applied and Environmental Microbiology* 63 2446-2448.
- 23 STOWA 2005. Slibketenstudie - Onderzoek naar de energie- en kostenaspecten in de water- en slibketen. STOWA, Utrecht, rapport 2005-26.
- 24 Van der Star W, Growth and metabolism of Anammox bacteria. Proefschrift, TU Delft, 2008.
- 25 Wett B 2007. Development and implementation of a robust deammonification process. *Water Science & Technology* 56 (7): 81-88.
- 26 Gut L., E Płaza, M Długot cka & B Hultman 2005. Partial nitrification process assessment. *Vatten*, 61(3), 175-182.
- 27 Kampschreur M J, W R L van der Star, H A Wielders, J W Mulder, M S M Jetten & M C M van Loosdrecht 2008. Dynamics of nitric oxide and nitrous oxide emission during full-scale reject water treatment. *Water Research* 42: 812-826.
- 28 Jetten M S M, S J Horn & M C M van Loosdrecht 1997. Towards a more sustainable municipal wastewater treatment system. *Water Science & Technology* 35 (9): 171-180.