



Anammox in Rotterdam overtreft verwachtingen

WIEBE ABMA, PAQUES

JAN WILLEM MULDER, WATERSCHAP HOLLANDE DELTA

WOUTER VAN DER STAR, TU DELFT

MARC STROUS, RADBOUD UNIVERSITEIT NIJMEGEN

De eerste praktijkreactor met het Anammox-proces is succesvol opgestart. De installatie laat een stabiele werking zien, zelfs bij belastingen die 50 procent hoger liggen dan de ontwerpwaarde. Met deze ervaringen kan gesproken worden van een bewezen technologie. Hiermee lijkt deze duurzame en kosteneffectieve technologie klaar voor bredere toepassing in de praktijk.

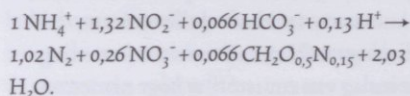
Eind jaren tachtig werd door Arnold Mulder van Gist Brocades de Anammox-conversie voor het eerst waargenomen³⁾. In de jaren daarna was de grote uitdaging deze conversie te benutten voor het zuiveren van afvalwater. De door de anammoxbacterie uitgevoerde oxidatie van ammonium met nitriet als elektronacceptor heeft grote voordelen ten opzichte van conventionele stikstofverwijdering. Dankzij de technologie kan de dosering van elektrondonor worden geëlimineerd en het energieverbruik met 60 procent worden gereduceerd. Bovendien kan de op Anammox-technologie gebaseerde installatie compact worden gebouwd, waardoor de investeringskosten relatief laag zijn. Naast een hoge kosteneffectiviteit levert Anammox een flink duurzaamheidsvoordeel. Per ton verwijderde stikstof wordt vier ton kooldioxide minder geproduceerd in vergelijking met conventionele biologische stikstofverwijdering.

Dankzij het werk van de Technische Universiteit Delft in de jaren negentig is de anammoxbacterie ontdekt⁶⁾. Dit werk heeft toepassing van het Anammox-proces aanzienlijk dichterbij gebracht. Vervolgens heeft Paques de technologie verworven voor toepassing op praktijkschaal. Het toenmalige ZHEW, thans Waterschap Hollandse Delta, heeft besloten om de reeds aanwezige SHARON-reactor op de rwzi Dokhaven aan te vullen met de Anammox-technologie. Met deze investering is er voor gekozen om de stikstofverwijdering uit het slibperswater nog verder te verduurzamen en het energie- en chemicaliënverbruik te reduceren. De reactor vormt de eerste praktijkinstallatie op basis van de Anammox-technolo-

gie. Na een periode van onderzoek en optimalisatie presteert de installatie inmiddels boven verwachting.

Anammox

De naam Anammox is afgeleid van anaërobe ammonium oxidatie. Ammonium wordt door de anammoxbacterie zonder zuurstof maar met nitriet als elektronacceptor geoxideerd naar stikstofgas volgens de onderstaande reactievergelijking⁵⁾.



Voor deze omzetting blijkt een specifieke bacterie verantwoordelijk. Hoewel de bacterie eerst in de wereld van afvalwaterzuivering is ontdekt, blijkt steeds meer dat de anammoxbacterie ook in de natuur een belangrijke rol speelt. Zo neemt de bacterie ruim de helft van de stikstofverwijdering in de zee voor haar rekening²⁾.

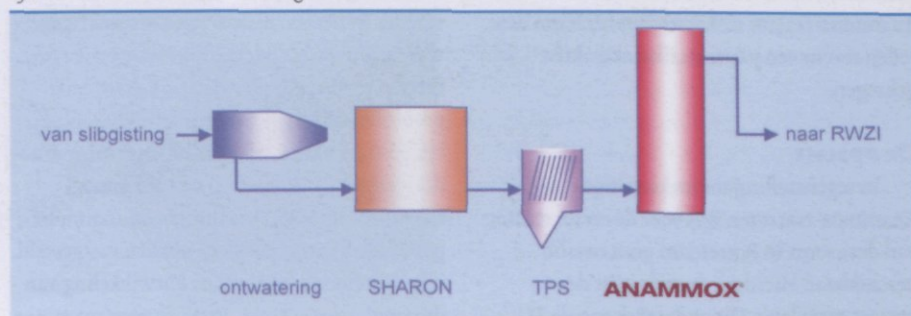
Zoals blijkt uit de reactievergelijking is de bacterie autotroof, wordt kooldioxide gebruikt als koolstofbron en hoeft er dus geen organische koolstofbron te worden toegevoegd. Naast de productie van stikstof wordt circa tien procent van de geconverteerde stikstofverbindingen omgezet in nitraat. Deze nitraatvorming blijkt direct gekoppeld aan de vorming van biomassa. De bacterie groeit langzaam; hij verdubbelt zich in elf dagen⁵⁾. Hierbij kan de bacterie op natuurlijke wijze korrels vormen. De anammoxbiomassa is herkenbaar aan een bloedrode kleur, veroorzaakt door specifieke enzymen.

Het proces

De eerste Anammox-reactor wereldwijd is gerealiseerd op de slibverwerking van de rwzi Dokhaven in Rotterdam. In combinatie met de reeds aanwezige SHARON-reactor vormt de Anammox-reactor hier de deelstroombehandeling. De deelstroom, het zogenaamde rejectiewater van de slibontwatering, bevat 1.000 tot 1.500 mg/l ammoniumstikstof. Door de verwijdering van het stikstof uit deze deelstroom wordt de stikstofbelasting op de rwzi Dokhaven met 10 tot 15 procent verminderd, waardoor het rendement van deze zuivering verbetert⁴⁾. In afbeelding 1 wordt de deelstroombehandeling schematisch weer gegeven.

De SHARON-reactor werd op deze locatie door Grontmij gerealiseerd en is in bedrijf genomen sinds 1999. In eerste instantie werd in deze reactor genitritificeerd (tot nitriet) en vervolgens gedenitricificeerd. Hiertoe werd methanol als BZV-bron toegevoegd. Met de combinatie met het Anammox-proces is de bedrijfsvoering aangepast. Sinds eind 2004 is de dosering van methanol volledig gestopt. Als gevolg daarvan daalt de pH en wordt de nitritificatie geremd, waardoor de conversie ongeveer halveert. De beluchttingsenergie, die nagenoeg volledig het energieverbruik van de deelstroombehandeling bepaalt, wordt hierbij evenredig gereduceerd. Het effluent van de SHARON-reactor bevat nu NH_4^+ en NO_2^- in een verhouding van ongeveer 1:1,2. Voordat het water in de Anammox-reactor wordt geleid,

Afb. 1: De deelstroombehandeling.



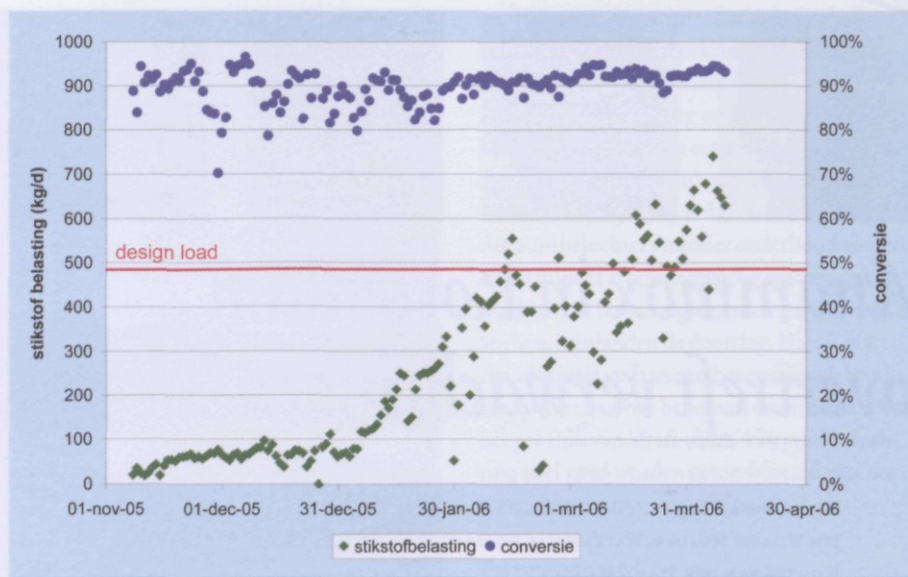
passeert het een lammellenafscheider. Hier wordt het resterende slib verwijderd. Met name bij de opstart van het proces, waarbij het slib nog niet aanwezig is in de vorm van korrels, is het van belang inspoeling van vaste stof zoveel mogelijk te beperken om een zo lang mogelijke slibleef tijd te realiseren. In de reactor worden ammonium en nitriet door de anammoxbiomassa omgezet in stikstofgas. In het gekozen reactortype met een interne gaslift wordt korrelvorming gestimuleerd. Hierdoor is een goede slibretentie gewaarborgd en kan een hoge slibconcentratie worden gehandhaafd. Bovendien is de reactor goed gemengd, gedreven door de gasproductie van de anammoxbacteriën. Om de menging te vergroten kan het gas door middel van een compressor worden gecirculeerd. Het afvalwater wordt bij de bodem van de reactor ingebracht. Het gezuiverde water verlaat de reactor aan de top. De reactor heeft een volume van 70 kubieke meter. De ontwerpbelasting is 500 kilo stikstof per dag, overeenkomstig met de jaargemiddelde stikstofvracht in het slibperswater.

De aanloop

De TU Delft voerde op labschaal testen uit om de haalbaarheid van het gebruik van de combinatie van SHARON en Anammox voor de behandeling van slibperswater te bepalen¹⁾. Hiervoor werd het slibperswater van de locatie Sluisjesdijk gebruikt. Op basis van dit onderzoek werd geconcludeerd dat de toepassing van de combinatie haalbaar is. Bij het onderzoek is gebruik gemaakt van een sequencing batch reactor (SBR). Deze reactor haalde een omzetting van 1 kilo stikstof per kubieke meter per dag. Bij vervolgonderzoek door Paques in een continue doorstroomde gasliftreactor werd aangetoond dat veel hogere conversiesnelheden kunnen worden gehaald. Op basis van dit onderzoek werd voor de praktijkinstallatie gekozen voor een continue doorstroomde Anammox-reactor. Een belangrijke keuze in het opschalingstraject van het Anammox-proces is het overslaan van de pilotfase. Voor de behandeling van de volledige deelstroom van Waterschap Hollandse Delta bleek een reactor nodig van slechts 70 kubieke meter. De kosten voor deze praktijkinstallatie bleken beperkt hoger dan voor een pilotinstallatie. De directe opschaling naar praktijkschaal brengt echter extra risico met zich mee. De eerste full-scale Anammox-reactor in Rotterdam heeft om deze reden tevens een pilotinstallatiekarakter gekregen.

De opstart

In tegenstelling tot toekomstige Anammox-reactoren was voor de eerste reactor van deze soort in Rotterdam geen entslib beschikbaar. Hierdoor duurde juist deze opstart extra lang. Uit onderzoek van de TU



Afb. 2: Stikstofbelasting en conversie versus tijd.

Delft bleek dat het actiefslib van de rwzi Dokhaven geringe concentraties anammoxbacteriën bevat. Besloten werd om dit slib als entmateriaal te gebruiken. Voor de beoogde capaciteit diende de populatie zich met een factor miljoen te vermeerderen. Op basis van onderzoek op labschaal bleek dat dit resultaat binnen een half jaar kon worden bereikt. Er werd voor de opstart van de reactor in Rotterdam rekening gehouden met een opstarttijd van twee jaar, rekening houdend met optredende aanloopproblemen als gevolg van het overslaan van een pilotfase.

De opstart heeft uiteindelijk 3,5 jaar geduurd, 1,5 jaar langer dus dan aanvankelijk verwacht. Deze vertraging had verschillende oorzaken: problemen met operationele stabiliteit (met name incidenteel slibverlies en bevroeringsproblemen), toxiciteit (remming door inslag van zuurstof), te hoge nitrietconcentraties en incidentele lozingen van afvalwater van chemische toiletten direct op de slibgisting van de rwzi. Tenslotte hebben zich problemen voorgedaan met menging, met als gevolg het optreden van dode zones en remming ten gevolge van sulfidevorming.

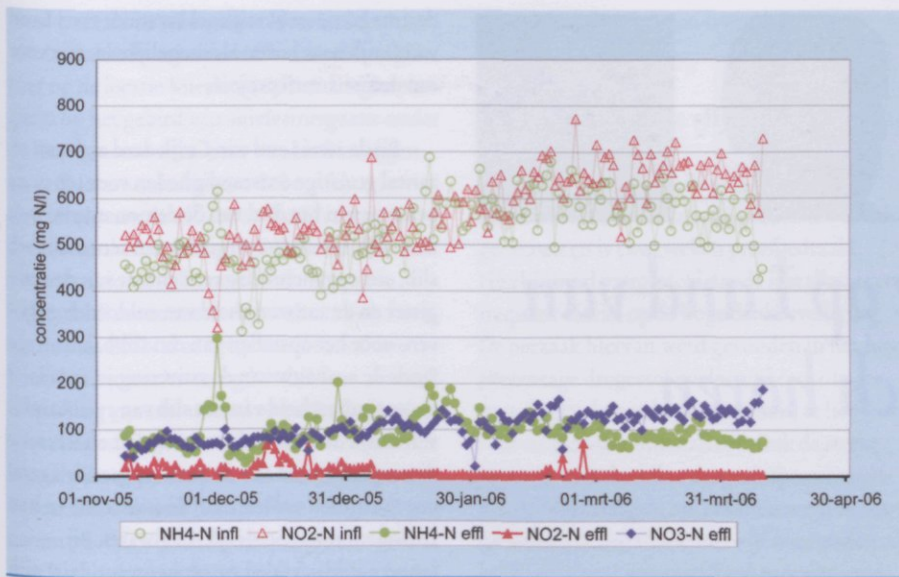
De genoemde problemen bleken eenvoudig op te lossen door verbeteringen in de procesbeheersing en door aanpassingen aan de installatie. Het effect op de voortgang was echter relatief groot. Dit is een gevolg van de initieel lage anammoxconcentratie in de reactor. In het eerste deel van het opstarttraject was de conversie door anammoxbacteriën niet meetbaar. Hierdoor werd een doeltreffende probleemanalyse zwaar belemmerd. Dankzij het gebruik van moleculair biologische methodes (realtime PCR-meting van anammox-DNA), waarmee de omvang van de anammoxpopulatie kwantitatief kan worden vastgesteld, is het uiteindelijk gelukt de ontwikkeling van de populatie te volgen, zodat de voor anammox

juiste omstandigheden gecreëerd konden worden. Vanaf het moment dat de omstandigheden zijn geoptimaliseerd, blijkt de reactor aan de verwachtingen te voldoen en deze zelfs te kunnen overtreffen.

De werking

In afbeelding 2 is de belasting en het rendement van de Anammox-reactor tegen de tijd uitgezet. Uit de grafiek blijkt dat de belasting en de conversie sinds begin 2006 sterk zijn toegenomen. Halverwege februari werd de ontwerpbelasting gerealiseerd. Hiermee voldoet de installatie aan de ontwerpspecificaties. Als gevolg van stilstand van de slibontwatering en daarmee van de productie van rejectiewater, was de aanvoer van stikstof in de daaropvolgende periode fluctuerend. Vanaf het moment dat de slibontwatering weer continu in bedrijf was, bleek de belasting verder opgevoerd te kunnen worden tot bijna 750 kilo per dag. Dit is 50 procent hoger dan de ontwerpbelasting. Uit de grafiek blijkt ook dat 90 tot 94 procent van de toegevoerde stikstof is omgezet. De conversie is hierbij 9,5 kilo stikstof per kubieke meter per dag.

In afbeelding 3 zijn de influent- en effluentconcentraties van de stikstofverbindingen van de Anammox-reactor uitgezet tegen de tijd. De toevoer van de reactor bevat 500-600 mg/l ammonium-stikstof en 600-700 mg/l nitriet-stikstof. Het nitraatgehalte van de toevoer is verwaarloosbaar en daarom niet weergegeven. Vanaf begin 2006 is de nitrietconcentratie in het effluent van de reactor lager dan 5 à 10 mg/l. Dit betekent dat de Anammox-reactie compleet is. Er waren enkele uitschieters van de nitrietconcentratie in het effluent. Deze zijn het gevolg van te snel opvoeren van de belasting. De ammoniumconcentratie in het effluent van de reactor schom-



Afb. 3: Stikstofconcentraties in het influent en het effluent.

melt tussen 60 en 130 mg/l. Deze concentratie bepaalt het uiteindelijke rendement van de reactor. Dit rendement kan nog verder worden verbeterd door de $NH_4^+ : NO_2^-$ -verhouding in het effluent van de SHARON-reactor te optimaliseren. Dit is een punt van verder onderzoek. Een specifiek kenmerk van de Anammox-reactie is de vorming van nitraat, zoals in de reactievergelijking is weergegeven. De toename van de nitraatconcentratie bedroeg in de laatste periode 100-150 mg/l.

Uit de afbeeldingen 2 en 3 blijkt dat de werking van anammox stabiel is. Zelfs bij hogere belastingen dan het ontwerp blijkt het proces zeer betrouwbaar. Sinds begin maart wordt anammoxbiomassa geoogst voor de opstart van een nieuwe reactor. Dit oogsten loopt in de tijd op van tien procent tot 25 procent van de slibmassa per week. Dit heeft geen negatieve invloed op de werking van de reactor. Tot nu toe is de maximaal aangebrachte belasting bijna 750 kilo stikstof per dag. Nader onderzoek moet uitwijzen of deze belasting verder kan worden opgevoerd, echter binnen de grenzen van de productie van stikstofrijk afvalwater vanuit het ontwateringsproces.

Perspectief

Met bovengenoemde resultaten is aangetoond dat de Anammox-technologie in de praktijk toepasbaar is. Hiermee komt het proces beschikbaar voor brede toepassing. Inmiddels zijn drie volgende Anammox-projecten in voorbereiding en deels in opstart. De opstart van de tweede Anammox-reactor in Lichtenvoorde nadert haar voltooiing. Deze reactor is onderdeel van een proces voor behandeling van afvalwater van een leerlooierij. In de derde reactor wordt het entrap anammox-proces voor het eerst toegepast voor behande-

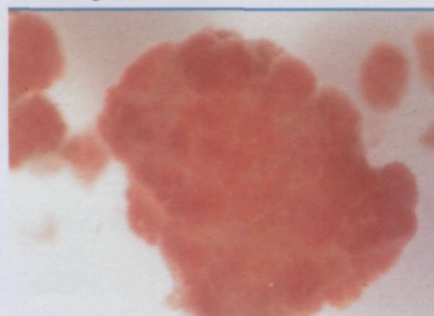
ling van effluent van een aardappelverwerkende fabriek. In dit proces worden partiële nitrificatie en anammox in één reactor gecombineerd. De opstart van deze reactor is onlangs begonnen. De vierde Anammox-reactor wordt gebouwd in Japan voor behandeling van afvalwater van de productie van halfgeleiders.

Conclusie

De eerste praktijkreactor met het Anammox-proces in combinatie met het SHARON-proces is succesvol opgestart. De opstart heeft relatief lang geduurd als gevolg van opschalingsproblemen in combinatie met de trage groeisnelheid van de anammoxbacterie. De reactor kan boven verwachting worden belast, met een conversie van 9,5 kg stikstof per kubieke meter per dag oftewel 50 procent boven de ontwerpwaarde. Ingeschat wordt dat de opstart van volgende Anammox-reactoren veel sneller zal verlopen. Enerzijds is kennis en ervaring opgedaan met de reactorconfiguratie. Anderzijds is er nu de beschikking over entmateriaal. Het onttrekken hiervan aan de reactor had geen negatieve invloed op de werking.

De combinatie SHARON-Anammox heeft voor Waterschap Hollandse Delta geleid tot een aanzienlijke reductie in het energieverbruik in de deelstroombehandeling (ruim

Anammox-granula.



250.000 kWh/jaar). Daarnaast wordt bespaard op dosering van methanol (180 ton/jaar). Hiermee zijn de beoogde kostenbesparing en de verbeterde duurzaamheid voor het waterschap gerealiseerd.

Met de ervaringen kan gesproken worden van een bewezen technologie. De ontwerpcriteria zijn zelfs overtroffen. Hiermee is deze duurzame en kosteneffectieve technologie klaar voor bredere toepassing in de praktijk.

De komende maanden wordt de bedrijfsvoering van SHARON en Anammox verder op elkaar afgestemd. Later dit jaar rapporteert de STOWA de praktijkresultaten van het gecombineerde proces.

LITERAATUUR

- 1) Van Dongen U., M. van Loosdrecht en M. Jetten (2001). The SHARON-Anammox process for treatment of ammonia rich wastewater. *Water Science Technology* nr. 44, pag. 153-160.
- 2) Kuypers M., G. Lavik, D. Woebken, M. Schmid, B. Fuchs, R. Amann, B. Jorgensen en M. Jetten (2005). Massive nitrogen loss from the Benguela upwelling system through anaerobic ammonium oxidation. *PNAS USA* 102 nr. 18, pag. 6478-6483.
- 3) Mulder A. (1992). Anoxic ammonia oxidation. U.S. Patent documents 427849(5078884).
- 4) Mulder J.-W., M. van Loosdrecht, C. Hellinga en R. van Kempen (2001). Full-scale application of the SHARON process for the treatment of rejection water of digested sludge dewatering. *Water Science Technology* nr. 11, pag. 127-134.
- 5) Strous M., J. Heijnen, J. Kuenen en M. Jetten (1998). The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* nr. 50, pag. 589-596.
- 6) Strous M., J. Fuerst, E. Kramer, S. Logemann, G. Muyzer, K. van de Pas-Schoonen, R. Webb, J. Kuenen en M. Jetten (1999). Missing lithotroph identified as new planctomyxete. *Nature* nr. 400, pag. 446-449.