

CENIRELTA: hoofdstroom-Anammox op RWZI Rotterdam-Dokhaven

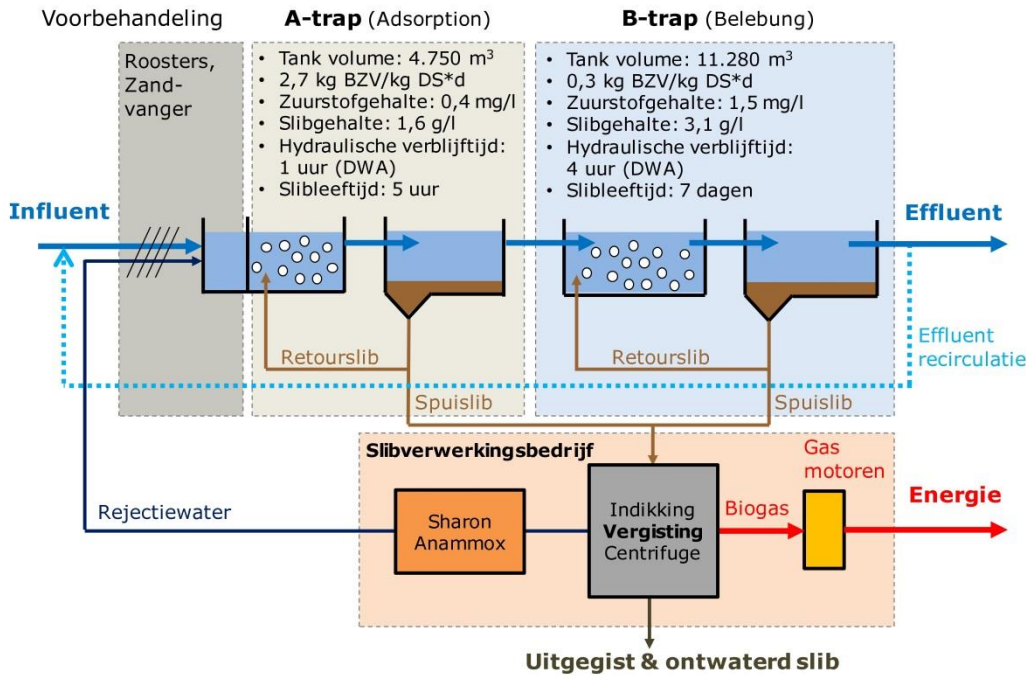
Stefan Geilvoet, Charlotte van Erp Taalman Kip, Olaf Duin (waterschap Hollandse Delta), Tim Hendrickx (Paques BV), Maaike Hoekstra (Technische Universiteit Delft)

Op RWZI Rotterdam-Dokhaven loopt het demonstratieproject CENIRELTA (2013-2016), met als doel de effectiviteit en robuustheid van het hoofdstroom-Anammox-proces aan te tonen. De tot nu toe behaalde resultaten tonen aan dat de potentiële activiteit van de biomassa ruim voldoende is om de gangbare stikstofvrachten in een communale RWZI via de Anammox-route te verwijderen. Door sturing van het zuurstofgehalte kon nitraatvorming succesvol worden onderdrukt. In de laatste maanden van het project wordt het afvalwater afgekoeld om het effect van langdurig lage temperaturen op het proces definitief vast te stellen.

Het Anammox-proces (zie kader) is ruim tien jaar een bewezen technologie voor de verwijdering van stikstof uit rejectiewater van slibverwerkingsinstallaties. Sinds de doorbraak in de deelstroombehandeling wordt intensief onderzoek verricht naar de mogelijkheden om de anammox-bacterie in te zetten in de hoofdstroom van een zuiveringsinstallatie. Momenteel worden de eerste stappen gezet om hoofdstroom-Anammox in de praktijk toe te passen, onder andere in het CENIRELTA-project op RWZI Dokhaven. Als dit succesvol blijkt kan gesproken worden van een kleine revolutie in de (communale) afvalwaterbehandeling; stikstofverwijdering wordt dan mogelijk in een compactere installatie en tegen een veel lager energieverbruik.

Rioolwaterzuiveringsinstallatie Rotterdam Dokhaven

Halverwege de jaren tachtig van de vorige eeuw werd in Rotterdam RWZI Dokhaven gebouwd, met een biologische capaciteit van 540.000 inwonerequivalenten (i.e.) en een hydraulische capaciteit van 19.000 m³/u. Om hinder voor de bewoonde omgeving te voorkomen werd de RWZI volledig ondergronds gebouwd en vanwege de beperkte beschikbare ruimte werd gekozen voor een compact tweetraps AB-systeem (zie afbeelding 1). In de eerste, hoog belaste trap wordt organisch materiaal zoveel mogelijk geadsorbeerd aan het slib (in plaats van geoxideerd) en wordt chemisch fosfaat verwijderd. Na een tussenbezinkstap vindt in de tweede, lager belaste trap verdere afbraak van organisch materiaal en nitrificatie plaats. Na een nabezinkstap wordt het effluent op de Nieuwe Maas geloosd.



Afbeelding 1. Processchema van de tweetraps RWZI Dokhaven (inclusief slijblijn)

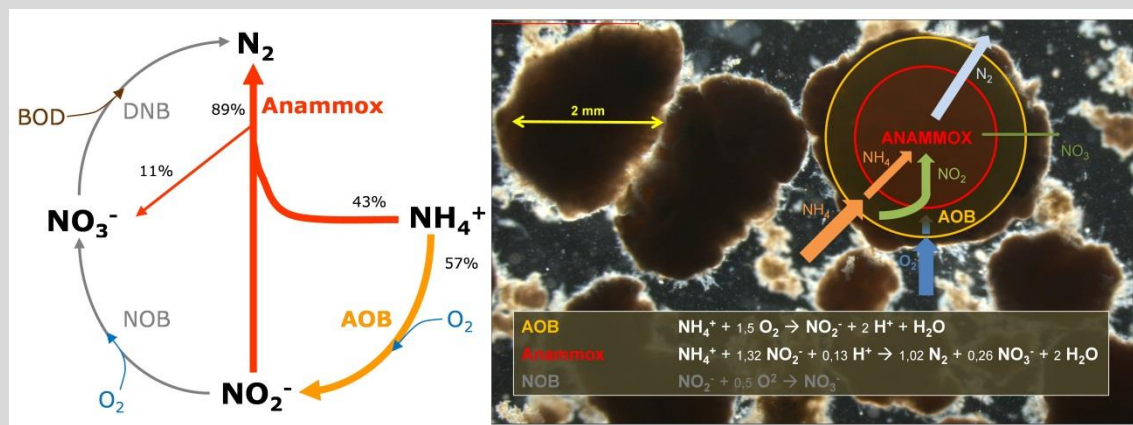
Voordelen van het AB-systeem zijn de compactheid en de effectieve terugwinning van organisch materiaal in de A-trap, waaruit via vergisting biogas en energie gewonnen kunnen worden. De achilleshiel van het AB-systeem is de beperking in de stikstofverwijdering, vanwege het ontbreken van een specifieke denitrificatiezone. Dit is dan ook de reden dat AB-systemen tegenwoordig uit de gratie zijn geraakt als zuiveringsconcept voor huishoudelijk afvalwater.

In de loop der jaren zijn diverse maatregelen getroffen om de stikstofverwijdering op Dokhaven te verbeteren. Op het slijbverwerkingsbedrijf van Dokhaven (Sluisjesdijk) is een Sharon-Anammox-deelstroombehandeling geplaatst voor verwijdering van stikstof uit het slijbrejectiewater. Hiermee wordt de interne belasting van Dokhaven met circa 20% gereduceerd. Daarnaast wordt nitraatrijk effluent gerecicleerd naar de A-trap, waar aanvullende denitrificatie plaatsvindt. Met deze maatregelen is de jaargemiddelde totaal-stikstofconcentratie in de loop der jaren geleidelijk teruggebracht van ongeveer 25 naar 15 mg/l N-totaal. Hiermee wordt ruim voldaan aan de lozingseis (21 mg/l N-totaal), maar blijft Dokhaven achter bij de eisen die tegenwoordig aan een RWZI met dergelijke capaciteit worden gesteld.

Omdat een toekomstige aanscherping van de lozingseis een realistische verwachting is, zijn diverse alternatieven onderzocht om een betere stikstofverwijdering te realiseren. Mogelijke scenario's waren onder meer ombouw naar een membraanbioreactor, nabehandeling met denitrificerende zandfilters, inpassing van een slijb-op-dragersysteem en denitrificatie in de nabezinktanks door methanoldosering. Al deze oplossingen waren echter ofwel technisch niet mogelijk, of pasten niet in het beleid van waterschap Hollandse Delta om op duurzame wijze en tegen maatschappelijk aanvaardbare kosten het afvalwater te zuiveren.

Anammox

De spil in het Anammox-proces is de gelijknamige bacterie, die pas eind jaren tachtig toevalligerwijs werd ontdekt [1]. Anaerobe ammoniumoxidatie- (Anammox)-bacteriën zijn in staat onder zuurstofloze omstandigheden ammonium (NH_4^+) en nitriet (NO_2^-) direct om te zetten in stikstofgas (N_2). Om de totale reactie te laten plaatsvinden zijn ook ammonium oxiderende bacteriën (AOB) nodig die een gedeelte van het ammonium omzetten in nitriet. Via de AOB-Anammox-route is een aanzienlijk kortere weg mogelijk in de stikstofkringloop dan in de 'traditionele' nitrificatie-denitrificatieroute (zie afbeelding 2). Dit resulteert in een 60% lager zuurstofverbruik en bovendien is er geen organisch materiaal nodig voor de denitrificatie. De procestechnologische uitdaging is om de traag groeiende anammox-bacteriën en de AOB in het systeem te behouden en tegelijkertijd de groei/activiteit van nitriet oxiderende bacteriën (NOB) en andere ongewenste biomassa te onderdrukken.



Afbeelding 2. Stikstofkringloop met de Anammox-route (l) en one-step Anammox met korrelslib (r)

Sleutelfactor in het Anammox-proces is het feit dat de bacteriën in een korrelstructuur groeien, waardoor ze relatief eenvoudig van vlokkelige biomassa te scheiden zijn. In warme en geconcentreerde deelstroomomstandigheden (30-35 °C, > 1000 mg/l NH_4^+ -N) vormt het ANAMMOX[®]-proces nu ruim 10 jaar een bewezen technologie, met onder meer de wereldwijd eerste reactor op de slibverwerkingsinstallatie Sluisjesdijk [2]. Tegenwoordig wordt het ANAMMOX[®]-proces voornamelijk toegepast volgens het one-step-principe; hierbij groeien de anammox-bacteriën en AOB in één reactor, met een anaerobe anammox- (korrel)kern met daar omheen een aerobe schil AOB (zie afbeelding 2).

Het gepatenteerde Anammox-proces zoals ontwikkeld door Paques heet verwarrend genoeg ANAMMOX[®], met hoofdletters en het trademark-teken [2]. Vandaar dat in dit artikel verschillende aanduidingen worden gebruikt. Het Anammox-proces wordt aangeduid met een hoofdletter en volledig in hoofdletters en met een trademark-teken als het het gepatenteerde proces betreft. De betreffende bacterie wordt met een kleine letter aangeduid.

Uit de succesvolle toepassing van anammox-technologie op het rejectiewater van slibverwerkingsbedrijf Sluisjesdijk [2] kwam het idee voort om de haalbaarheid van dit zuiveringsconcept in de hoofdstroom van een RWZI te onderzoeken. Ten opzichte van de andere varianten is Anammox een interessant alternatief, omdat er geen chemicaliën of relatief dure (filtratie)processen nodig zijn. Daarnaast leent een tweetraps proces als dat van RWZI Dokhaven zich uitstekend voor inpassing van het Anammox-proces. Ten slotte vormt de implementatie van Anammox een impuls voor verdere optimalisatie van de A-trap en de ambitie van waterschap Hollandse Delta om van Dokhaven een energie-neutrale RWZI te maken.

CENIRELTA

De huidige uitdaging is om Anammox in te zetten in de hoofdstroom van een RWZI. Door de lagere temperaturen en de beperkte beschikbaarheid van substraat (stikstof) is de competitie met andere organismen in hoofdstroom-toepassing veel heviger. Van 2010 tot halverwege 2013 is een studie uitgevoerd naar de technische haalbaarheid van hoofdstroom-Anammox. Op basis van de positieve resultaten [3] werd besloten om door te gaan met de ontwikkeling, in de vorm van het demonstratieproject *CENIRELTA: Cost Effective Nitrogen Removal from wastewater with Low Temperature Anammox* [4].

CENIRELTA is een samenwerking tussen de partners Paques (zie kader), waterschap Hollandse Delta en Stowa, en wordt gesteund door een Life-subsidie van de Europese Unie. Ook de Technische Universiteit Delft is betrokken als (wetenschappelijke) kennispartner. Het doel van CENIRELTA, dat loopt van 2013 tot en met 2016, is demonstreren dat hoofdstroom-Anammox een effectieve, robuuste en duurzame zuiveringstechnologie biedt. Naast de stikstofverwijdering gaat het hierbij om het totale concept inclusief sliblijn, energiebalans en vertaling naar de praktijk. Het project is onderverdeeld in drie deelaspecten: (1) optimalisatie van de A-trap (i.e. maximale adsorptie van organisch materiaal), (2) optimalisatie van de sliblijn (i.e. maximale conversie van organisch materiaal naar energie) en (3) Anammox in de hoofdstroom.

De grootste uitdaging is aan te tonen dat Anammox in de hoofdstroom een effectieve en robuuste stikstofverwijdering kan realiseren en daarmee het conventionele actiefslibproces in de B-trap kan vervangen. Dit gebeurt in de CENIRELTA-demonstratie-installatie, die een deel van de afloop van de tussenbezinktank behandelt. In een van de buitenlucht afgesloten reactor wordt het afvalwater belucht en gemengd met anammox-AOB-korrelslib (zie afbeelding 3). De beluchting dient tevens als bron van schuifspanning langs de korrels. Door gedoseerde toevoeging van verse lucht kan het zuurstofgehalte geregeld worden. Met behulp van een afscheider worden de korrels gescheiden van het gezuiverde water en de vlokkige bestanddelen.



Afbeelding 3. De CENIRELTA-demonstratie-installatie op RWZI Dokhaven(I) en anammox-korrelslib(r)

Fasering onderzoek

Volumetrische omzetting en effluentconcentratie

Een belangrijke invloedsfactor op het zuiveringsproces van Dokhaven is de recirculatie van nitraatrijk effluent naar de A-trap voor aanvullende denitrificatie. Hierdoor wordt het afvalwater verdund en zijn de ammoniumconcentraties in de afloop van de tussenbezinktank relatief laag (19 mg/l NH₄⁺-N jaargemiddeld). In de eerste helft van het project werd daarom ammoniumchloride gedoseerd aan het voedingswater (tot 30-40 mg/l NH₄⁺-N) om de effluentrecirculatie te compenseren. Omdat

eventuele inpassing van Anammox in de praktijk gefaseerd zal gaan plaatsvinden (over vier straten) en de effluentrecirculatie nodig zal blijven voor de conventionele straten, moet het proces ook bij lagere concentraties goed blijven functioneren. In de tweede helft van het project werd de ammoniumdosering daarom gestopt en werd de demo-installatie gevoed met precies hetzelfde water als de huidige B-trap. Tijdens de periode met ammoniumdosering was de doelstelling om een zo hoog mogelijke volumetrische stikstofverwijdering te halen en was de uiteindelijke effluentconcentratie niet leidend. In de periode zonder dosering speelde ammoniumlimitatie een belangrijke rol en was de doelstelling juist het behalen van een lage effluentconcentratie.

Temperatuur

Een belangrijke invloedsfactor op het Anammox-proces is de watertemperatuur. Bij dalende temperaturen neemt de specifieke activiteit van anammox-bacteriën snel af. Dit betekent dat de competitie tussen anammox en NOB om het beschikbare nitriet, zeker in de wintermaanden, moeilijker in het voordeel van de anammox te sturen is. In de eerste winterperiode (2013-2014) was nog een verwarmingsinstallatie voor het influent geïnstalleerd, zodat de minimale temperatuur van het afvalwater op 16 °C kon worden gehouden. In de tweede winterperiode (2014-2015) werd de verwarmingsinstallatie geleidelijk uitgeschakeld, waarbij de temperatuur daalde naar ca. 12 °C (met uitschieters naar 10 °C). In 2016 is zelfs een koelinstallatie geplaatst om de temperatuur geforceerd te kunnen verlagen en zo de invloed van een (langdurig) lagere temperatuur op de competitie te kunnen onderzoeken.

Resultaten

Opstartfase

Om het proces op te starten werd de reactor geënt met korrelslib afkomstig uit een one-step ANAMMOX[®]-reactor, met daarin dus zowel anammox-bacteriën als AOB. Het slib blijkt zich snel aan te passen aan de nieuwe omstandigheden; in ongeveer een week tijd werd een stabiele situatie bereikt. Hoewel de specifieke activiteit veel lager is dan in de omstandigheden bij deelstroombehandeling, blijkt deze bij een representatieve hoeveelheid entslib ruim voldoende om de stikstofvrachten om te zetten die gangbaar zijn in communaal afvalwater.

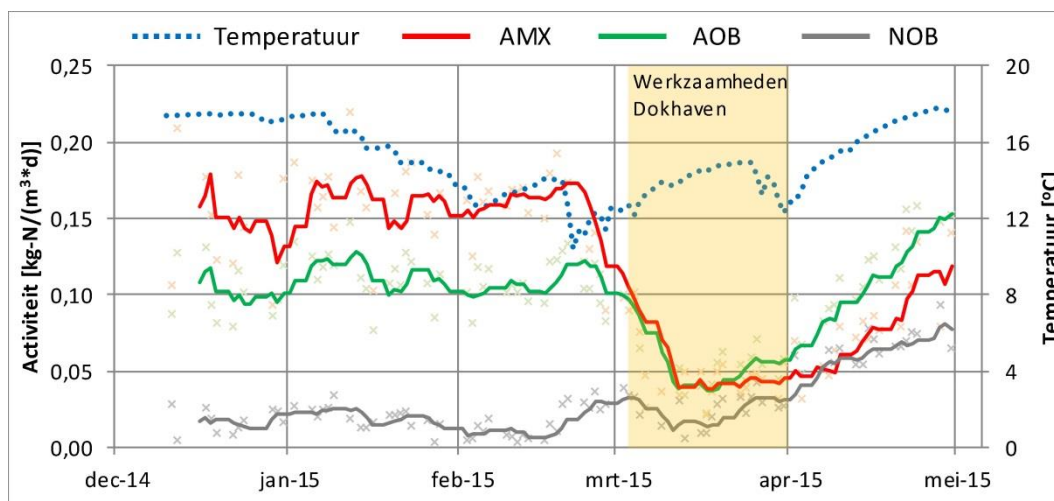
Volumetrische verwijdering

De volumetrische stikstofbelasting van de B-trap van Dokhaven bedraagt jaargemiddeld ongeveer 300 g N/(m³_{reactor}*dag). Door de aanvullende dosering van ammonium aan het voedingswater was de belasting van de demo-installatie in de eerste helft van het project met circa 370 g N/(m³*dag) nog iets hoger. In de zomermaanden van 2013 en 2014 werd, over aaneengesloten periodes van ongeveer drie maanden, een volumetrische verwijdering van gemiddeld 250 g N/(m³*dag) behaald, met uitschieters naar 300 g N/(m³*dag). Hiermee was de volumetrische verwijdering dus ruim voldoende om de stikstofvracht van Dokhaven verregaand te verwijderen. Deze hoge verwijdering kon echter niet over een langere periode worden vastgehouden. Zowel in 2013 als in 2014 was dit te wijten aan geleidelijk verlies van korrels uit het systeem. Eind 2014 is een technische aanpassing doorgevoerd; vanaf dit moment was uitspoeling of verlies van korrels uit het systeem niet langer een probleem.

Temperatuurdaling en verstoring A-trap

Na de technische aanpassing is de reactor in december 2014 opnieuw opgestart. In afbeelding 4 zijn de watertemperatuur en de voortschrijdend weekgemiddelde activiteit van anammox (AMX), AOB en NOB vanaf dat moment weergegeven. Hoewel de volumetrische omzetting met circa 150 g N/(m³*dag) lager was dan in de voorliggende periode bleef de omzetting stabiel, ondanks moeilijke omstandigheden met veel neerslag en uitspoeling van zwevende stof uit de A-trap. Vanaf januari 2015 werd de verwarmingsinstallatie geleidelijk uitgeschakeld, waardoor de watertemperatuur

daalde van circa 18 naar 12 °C. Ondanks deze fikse daling bleef de activiteit van de AOB en AMX in de reactor stabiel en werd de activiteit van de NOB succesvol onderdrukt. De resultaten tonen dus aan dat het proces goed in staat was de temperatuurdaling op te vangen.



Afbeelding 4. Temperatuur en activiteit Anammox, AOB en NOB (dec 2014 – mei 2015)

Vanaf februari werd de verwarmingsinstallatie volledig uitgeschakeld en was de watertemperatuur in de demo-installatie gelijk aan die in Dokhaven. In eerste instantie bleef de verwijdering stabiel, maar eind februari volgde een periode met extreem veel neerslag en hagel. Het gevolg hiervan was een verhoogde uitspoeling van zwevende stof uit de A-trap en een sterke daling van de AOB-activiteit, waarna ook de AMX-activiteit daalde. In de gehele maand maart werden ingrijpende onderhoudswerkzaamheden uitgevoerd op Dokhaven waardoor het proces geen tijd kreeg om te herstellen. De concentraties zwevende stof en het biologisch en chemisch zuurstofverbruik (BZV en CZV) van de afloop-tussenbezinktank werden ongeveer een factor twee hoger dan normaal. Dit leidde tot een daling van de AOB- en AMX-activiteit. Ook het proces op Dokhaven was in deze periode sterk ontregeld. Na afronding van de werkzaamheden en terugkeer naar normale bedrijfsvoering herstelde het proces in RWZI Dokhaven binnen ongeveer twee weken. Ook het proces in de demo-installatie herstelde, maar langzamer. In ongeveer een maand tijd (april) kon de AOB-activiteit hersteld worden naar de oorspronkelijke waarde. De AMX-activiteit herstelde langzamer, wat inhield dat het door de AOB gevormde nitriet meer naar NOB en dus naar nitraat ging in plaats van via de Anammox-route. In mei volgde een technische storing aan de demo-installatie waardoor de run moest worden onderbroken.

Wel kon aangetoond worden dat het proces goed in staat was om een geleidelijke temperatuurverlaging op te vangen. De verslechtering van het proces was vooral te wijten aan extreme omstandigheden (zware neerslag en langdurige verstoring van de A-trap). Duidelijk is dat een goede voorbehandeling van het afvalwater cruciaal is voor een stabiel Anammox-proces.

Effluentconcentratie

In juli 2015 werd een nieuwe run van de reactor gestart. Vanaf dit moment werd geen ammoniumchloride meer toegevoegd aan het influent en werd het debiet naar de demo-installatie verhoogd in verhouding met het recirculatie-debiet op Dokhaven. De demo-installatie kreeg hierdoor te maken met moeilijkere omstandigheden (minder inkomende stikstof in verhouding tot andere bestanddelen en een kortere verblijftijd in de reactor), maar leverde stabiele prestaties. Door sturing van het zuurstofgehalte op basis van de ammoniumconcentraties kon de NOB-activiteit succesvol onderdrukt worden. Over de periode juli - oktober werd een gemiddelde effluentkwaliteit bereikt van 8,8 mg/l N-totaal (bij influent 15,0 mg/l, 40% verwijderingsrendement). Hiermee leverde de demo-installatie een betere effluentkwaliteit dan RWZI Dokhaven (10,1 mg/l N-totaal).

Door een combinatie van frequente regenval (i.e. inspoeling zwevende stof uit A-trap) en enkele technische storingen verslechterde de structuur van de korrels in oktober - november. De NOB wonnen de competitie om zuurstof en nitriet in de korrelenschil, waardoor de anammox-activiteit daalde. Uit aanvullende experimenten bleek dat de (potentiële) anammox-activiteit nog ruim voldoende was, maar dat de verslechtering dus specifiek het gevolg was van de toegenomen NOB-activiteit. In het najaar van 2015 zijn tevergeefs diverse experimenten uitgevoerd om de korrelstructuur te herstellen (o.a. opschuren, verschillende chemicaliën).

Conclusies en perspectief

In het CENIRELTA-project is aangetoond dat hoofdstroom-Anammox de potentie heeft om de conventionele B-trap in een AB-systeem te vervangen. Activiteitstesten hebben aangetoond dat de potentiële AOB- en anammox-activiteit, bij stabiele omstandigheden, ruim voldoende zijn om de stikstofvrachten te verwijderen die gangbaar zijn in een communale RWZI. Door sturing van het zuurstofgehalte is aangetoond dat de NOB succesvol onderdrukt kunnen worden en een effluentkwaliteit van 8-10 mg/l N-totaal bereikt kan worden. Door verdere optimalisatie van het proces (zuurstofregeling, propstroom in plaats van gemengde tank) kan een nog betere effluentkwaliteit gerealiseerd worden.

Een belangrijk aandachtspunt is de robuustheid van het proces. Verschillende malen is gebleken dat het Anammox-proces gevoeliger is voor verstoringen in de A-trap dan het conventionele proces. Het is dus van belang dat de A-trap stabiel en goed functioneert. In samenhang hiermee is een ander cruciaal aandachtspunt de beheersing van de slibstructuur. Door de juiste omstandigheden te creëren is het goed gelukt om de competitie om groei op het korreloppervlak in het voordeel van de AOB te sturen. Als het proces echter eenmaal verstoord is dan blijkt het moeilijk om de AOB-activiteit te herstellen.

Een belangrijke vraag blijft hoe het proces zich houdt bij (langdurig) lage watertemperaturen. Door een combinatie van technische problemen en een aantal zachte winters is hier nog geen definitief antwoord op gevonden. Inmiddels is de verwarmingsinstallatie voor het influent vervangen door een koelinstallatie. In de resterende maanden van 2016 wordt onderzocht hoe het proces zich houdt bij (aanhoudend) lage temperaturen tot 10 °C.

Als de effectiviteit en robuustheid ook bij lagere temperaturen definitief aangetoond is kan de stap gezet worden naar implementatie in de praktijk. Paques heeft een voorontwerpstudie gedaan waaruit blijkt dat dit op Dokhaven binnen de huidige configuratie mogelijk is. In de B-trap kunnen zowel het zuiveringsproces als de korrel-waterscheiding plaatsvinden. De nabezinktanks blijven daarbij in ongewijzigde vorm in bedrijf voor de verwijdering van de zwevende stof.

Referenties

1. Mulder, A., Graaf, A.A. van de, Robertson, L.A., Kuenen, J.G. (1995). Anaerobic ammonium oxidation discovered in a denitrifying fluidized bed reactor. *FEMS Microbiology Ecology* 16, (3), 177–184.
2. <http://en.paques.nl/products/featured/anammox>
3. STOWA 2008-18 (2008). SHARON-Anammox-systemen. Evaluatie van rejectiewaterbehandeling op slibverwerkingsbedrijf Sluisjesdijk.
4. STOWA 2013-39 (2013). Toepassing van Anammox in de hoofdstroom van een rioolwaterzuivering.
5. Website CENIRELTA, www.cenirelta.eu, geraadpleegd 23 augustus 2016.