

## AUTEURS



Monique Slegers  
(Radboud  
Universiteit-  
Microbiologie)



Francisca  
Maalcke-Luesken  
(Radboud  
Universiteit-  
Microbiologie)



Mike Jetten  
(Radboud  
Universiteit-  
Microbiologie)



Tim Hendrickx  
(Paques BV)



Carla Frijters  
(Paques BV)



Richard Haarhuis  
(Waterstromen B.V.)

# INNOVATIEVE TECHNIEK VOOR VERWIJDEREN STIKSTOF EN METHAAN UIT AFVALWATER

Door twee biologische processen – partiële nitrificatie-anammox (PNA) en denitrificatie gekoppeld aan anaerobe methaanoxidatie (DAMO) – te combineren, ontstaat een veelbelovende afvalwaterzuiveringstechniek om het energieverbruik en de CO<sub>2</sub>-uitstoot verder te reduceren en tegelijkertijd het stikstofverwijderingsrendement te verhogen.

Verwijdering van stikstofverbindingen uit afvalwater kost veel energie. Tegelijkertijd bevat afvalwater energie. In het afgelopen decennium was er veel aandacht voor het terugwinnen van biogas uit afvalwater om de energie-efficiëntie van het zuiveringsproces te verbeteren en de klimaatvoetafdruk te verkleinen. Het effluent van de anaerobe processen die het biogas produceren bevat ammonium en opgelost methaan, een sterk broeikasgas. Met zogeheten DAMO micro-organismen (Figuur 1) is het mogelijk om opgelost methaan te verwijderen uit afvalwaterstromen. Deze micro-organismen hebben geen zuurstof nodig en verwijderen tegelijkertijd nitriet en nitraat. Een nieuwe biologische behandelingstechniek die partiële nitrificatie-anammox (PNA) combineert met DAMO kan stikstofverwijdering goedkoper en duurzamer maken.

De ontwikkeling van de gecombineerde PNA/DAMO-techniek vindt nu nog plaats op laboratorium schaal (2-10L reactoren). De stap van lab- naar praktijkschaal is groot. Als eerste tussenstap zijn daarom modelmatig toepassingsmogelijkheden verkend op praktijkschaal door het uitwerken van twee business cases. Dit artikel beschrijft op hoofdlijnen de resultaten hiervan en beantwoordt de vraag wat de economische potentie is van de PNA/DAMO-techniek.

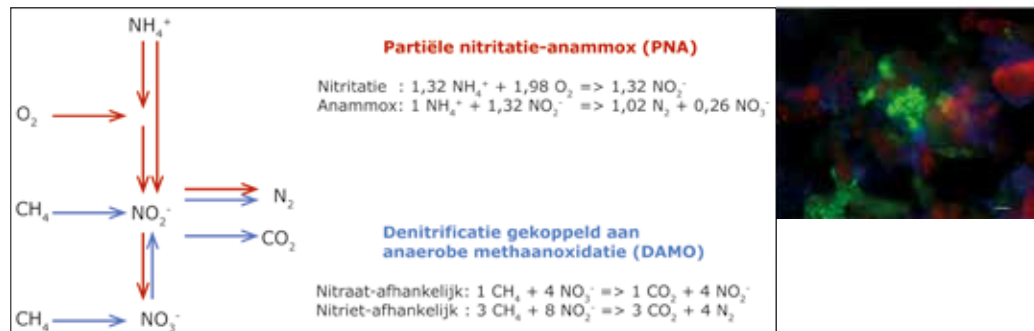
## De voordelen van PNA/DAMO

PNA-systemen worden al met succes toegepast op praktijkschaal sinds 2002. Het PNA-proces levert 60% energiebesparing op ten opzichte van conventionele nitrificatie-denitrificatie omdat niet al het ammonium volledig hoeft te worden omgezet naar nitraat. Zuurstofloze micro-organismen produceren daarbij minder biomassa, waardoor de slibproductie lager is. Het PNA-systeem zet vrijwel al het stikstof om naar stikstofgas, maar 10% gaat naar nitraat. Met de PNA/DAMO-techniek kan een verdere efficiëntieslag gemaakt worden. Het nitraat-afhankelijke DAMO-proces gebruikt het geproduceerde nitraat om methaan te verwijderen en levert daarbij nitriet op. Dit kan gebruikt worden in het anammox-proces, waardoor minder zuurstof nodig is voor de omzetting van ammonium naar nitriet, of in het nitriet-afhankelijke DAMO-proces voor verdere methaanverwijdering. Laboratoriumonderzoek laat zien dat in de PNA/DAMO-reactoren gelijktijdige verwijdering plaatsvindt van ammonium, nitriet, nitraat en methaan. Een stikstofverwijderingsrendement van meer dan 95% kan gehaald worden. Welke omzettingen er precies plaatsvinden is afhankelijk van de voedingsstoffen, gastoevoer, en soortenverhouding in de biomassa.

## Uitwerking van twee business cases

Het model met de biologische reacties (Figuur 1) is gebruikt om de economische potentie van gelijktijdige stikstof- en methaanverwijdering te verkennen voor twee afvalwater-

**Figuur 1.** De biologische reacties in de PNA/DAMO-techniek. Rechts: foto (fluorescentiemicroscoop) van biomassasamenstelling in een van de lab-reactoren na 9,5 maanden minimale zuurstoftoediening. Fluorescent gelabeld in rood: nitraat-afhankelijke DAMO; groen: nitriet-afhankelijke DAMO; blauw: anammox (schaal: 20µm). Foto door Karin Stultiens-RU



zuiveringsinstallaties. Op basis van de procesgegevens en afvalwatersamenstelling van deze locaties zijn business cases uitgewerkt. Er is gekeken naar toepassingsmogelijkheden voor de behandeling van effluentstromen van twee biogas producerende systemen:

1. Rejectiewater van de slibontwatering na anaerobe slibgisting op een rioolwaterzuiveringsinstallatie (RWZI).
2. Industrieel afvalwater (IWZI) na anaerobe afbraak van opgeloste organische stoffen in een UASB-reactor (Upflow Anaerobic Sludge Bed). In het huidige zuiveringsproces vindt hierna fosfaatverwijdering plaats in een beluchte reactor, gevolgd door stikstofverwijdering (PNA).

Omdat waterzuiveringsinstallaties geen methaan metingen doen in de waterfase, zijn op beide locaties monsters genomen om concentraties opgelost methaan te bepalen. Hieruit blijkt dat het opgeloste methaan na biogasproductie (~20 mg/L) voor ruim 95% verdwenen is in de volgende processtap. Op de RWZI wordt methaan gestript tijdens slibontwatering. Op de IWZI kan daarnaast verwijdering door aerobe methaanoxidatie plaatsvinden tijdens de fosfaatverwijdering.

Om de efficiëntie van de PNA/DAMO-techniek te kunnen beoordelen, is in het model uitgegaan van voldoende beschikbaar methaan om het in het PNA-proces gevormde nitraat te verwijderen. De technische aspecten van de methaantoevoeding (waar vandaan en hoe) en het voorkomen van methaanverlies zijn hierbij niet meegenomen.

De prestatie van de PNA/DAMO-techniek is aan de hand van prestatie- en systeemparameters (stap 1, Tabel 1) vergeleken met dat van het PNA-systeem. In het economisch model (stap 2 en 3) zijn de prestatieverbeteringen omgerekend naar een netto jaarlijkse

kostenbesparing op basis van actuele prijzen. Door verdiscontering zijn toekomstige kostenbesparingen uitgedrukt in de netto contante waarde. Er is een positieve business case wanneer deze waarde hoger is dan de initiële investeringskosten. De investeringskosten van PNA/DAMO zijn bepaald aan de hand van de benodigde reactorvolumes. Uitgangspunt hierbij is een volumetrische stikstofbelasting van maximaal 2 kilogram per kubieke meter per dag. Toekomstige (prijs)scenario's zijn uitgewerkt om de robuustheid van de resultaten te testen.

#### Hoger stikstofverwijderingsrendement met een lagere voetafdruk

De resultaten van stap 1 (Tabel 2) laten zien dat PNA/DAMO in beide business cases beter presteert dan PNA. Het stikstofverwijderingsrendement is ongeveer 10% hoger door de additionele verwijdering van nitraat. Dit maakt PNA/DAMO een aantrekkelijk systeem voor afvalwaterzuiveringsinstallaties die verdergaand  $\text{NO}_x$  moeten verwijderen. Het energieverbruik voor beluchting ligt ongeveer 20% lager per kilogram verwijderde stikstof.

Omdat PNA/DAMO minder zuurstof nodig heeft, is ook de slibproductie per kilogram verwijderde stikstof lager. De business cases laten een potentiële reductie van de broeikasgasuitstoot zien van 145 (bij deels aerobe methaanoxidatie) tot 330 ton  $\text{CO}_2$ -equivalenten per jaar (bij 100% methaan-stripping). Dit is het directe effect van minder methaanuitstoot en het indirecte effect van een lager energieverbruik. De stikstofbelasting van het rejectiewater op de RWZI is hoog genoeg om het opgeloste methaan te verwijderen. Op de IWZI (lagere stikstofbelasting) wordt ruim een derde deel van het methaan verwijderd.

#### Economische potentie

Voor beide locaties is er een positieve business case

Afvalwater:  
verwijderen  
stikstof en  
methaan

36

Stap 1. Procesprestatie →	Stap 2. Jaarlijkse kostenbesparing →	Stap 3. Economische potentie
<b>Prestatieparameters</b>	<b>(Prijs)Scenario's</b>	
1. Stikstofverwijderingsrendement 2. Energieconsumptie beluchting 3. Slibproductie 4. Klimaatvoetafdruk*	Investeringskosten: 500-2500 euro/m <sup>3</sup> reactorvolume Jaarlijkse kostenbesparingen PNA/DAMO t.o.v. PNA: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Huidige prijzen</li> <li>○ Wijziging lozingsheffing van Kjeldahl-N (huidig) -&gt; N-totaal</li> <li>○ CO<sub>2</sub>-prijzen: 5 (huidig) - 300 euro/ton</li> </ul>	
<b>Systeemparemeters</b>	<b>RWZI</b>	<b>IWZI</b>
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N belasting (kg/dag)	465	730
CH <sub>4</sub> verwijderd uit PNA/DAMO-systeem (kg/dag)	15	17,5
Debiet (m <sup>3</sup> /dag)	500	2900
Reactorvolume (m <sup>3</sup> )	280	600
HRT (uur)	14	5
	Periode:	RWZI 20 jaar/IWZI 10 jaar
	Discontovoet:	2-6%

\*CO<sub>2</sub>-equivalenten: 1 kg CH<sub>4</sub>=30,5 kg CO<sub>2</sub>; 1 kWh=0,395 kg CO<sub>2</sub>

is voor PNA/DAMO tot investeringskosten rond de €2000,- per kubieke meter reactorvolume (2% discontovoet) voor een groene weide situatie waarin nog geen stikstof wordt verwijderd na biogasproductie. De PNA/DAMO-techniek levert, ondanks de hogere procesefficiëntie, onder het huidige prijsscenario geen concurrerende business case op ten opzichte van het reeds toegepaste PNA-systeem.

Op dit moment ontbreekt de financiële stimulans om methaanuitstoot te reduceren omdat deze niet gemeten hoeft te worden en vanwege de lage CO<sub>2</sub>-prijzen op de Europese emissiehandelmarkt. Ook worden nitriet- en nitraatlozingen op dit moment niet meegenomen in de zuiveringsheffing. In de business cases is getest wat het effect is van de stijging van CO<sub>2</sub>-prijzen en een wijziging in de zuiveringsheffing voor stikstoflozing.

Bij een CO<sub>2</sub>-emissieprijs van €150,- per ton worden in beide cases de investeringskosten terugverdiend tot een investering van €500,- per kubieke meter reactorvolume (2% discontovoet). Het effect van stikstofheffing heeft een gelijksoortig resultaat. Wanneer beide wijzigingen meegenomen worden, is er tot een investering van €800,- per kubieke meter reactorvolume een positieve business case.

#### Aandachtspunten voor toepassing

Er is een aantal uitdagingen voor de toepassing van PNA/DAMO. Deels zijn deze gelijk als die bij de ontwikkeling van PNA. Een kleine hoeveelheid zuurstof is nodig voor nitritatie. Anammox en DAMO zijn anaerobe micro-organismen met een relatief

Tabel 1. Aanpak en uitgangspunten in de business cases

lage groeisnelheid. De zuurstofregulering en biomassa-retentie zijn daarom kritische factoren bij het ontwerp van een PNA/DAMO-systeem. Een goede zuurstofregulering is daarnaast belangrijk om overproductie van nitriet en competitie met snelgroeiende aerobe micro-organismen te voorkomen. De denitrificatieprocessen in de PNA/DAMO-techniek zijn niet afhankelijk van organisch koolstof. De organische stof kan dus vooraf

efficiënt naar biogas omgezet worden. Dit voorkomt later competitie met heterotrofe denitrificatoren. De slibkorreltechnologie biedt een oplossing voor deze uitdagingen en wordt succesvol toegepast in PNA-systemen. Uit labonderzoek blijkt dat biomassa in het PNA/DAMO-systeem ook als slibkorrels kan groeien.

Een andere uitdaging is de slechte oplosbaarheid van methaan. Een belangrijk inzicht bij de uitwerking van de business cases was het verlies van opgelost methaan tussen de bemonsteringspunten in beide afvalzuiveringsinstallaties. Eerder onderzoek naar methaanuitstoot van een RWZI laat zien dat ongeveer 75% van de totale CO<sub>2</sub>-uitstoot plaatsvindt in de sliblijn. Er is veel winst te behalen door het reduceren van de methaanuitstoot tijdens het zuiveringsproces, bijvoorbeeld door het afdekken van reactoren en het opvangen van afgassen.

Het gebruik van methaan voor PNA/DAMO levert in beide business cases jaarlijks een directe reductie van methaanuitstoot van 300 ton CO<sub>2</sub>-equivalenten. Daarnaast is het een efficiënte denitrificatiestap met voor beide locaties samen een jaarlijkse besparing van 60 MWh aan beluchtingskosten. Beluchting moet zorgvuldig toegepast worden om methaan-stripping te voorkomen. Mogelijke reactor systeemontwerpen en de toepasbaarheid ervan moeten nader onderzocht worden.

De uitstoot van lachgas is niet meegenomen. Het DAMO-proces zelf produceert geen lachgas, maar andere biologische processen die mogelijk in het systeem plaatsvinden kunnen dit wel. Onderzoek moet

Prestatieparameters	Locatie	Techniek	
		PNA	PNA/DAMO
Stikstofverwijderingsrendement (%)	RWZI	80,5	90,9
	IWZI	77,8	88,2
Energieconsumptie beluchting (kWh/kg N verwijderd)	RWZI	1,2	1,0
	IWZI	2,2	1,7
Slibproductie (kg/kg N verwijderd)	RWZI	0,1	0,095
	IWZI	0,1	0,095
Klimaatvoetafdruk (door directe methaanuitstoot en elektriciteitsverbruik; in ton CO <sub>2</sub> -equivalenten)	RWZI	181 <sup>1</sup>	66 <sup>1</sup>
	IWZI	837 <sup>1</sup> 212 <sup>2</sup>	622 <sup>1</sup> 182 <sup>2</sup>

<sup>1</sup> 100% strippen van methaan indien niet verwijderd via DAMO.

<sup>2</sup> 100% aerobe methaanoxidatie indien niet verwijderd door DAMO.

Tabel 2. Theoretische procesprestaties van PNA en PNA/DAMO in beide business cases

Speciale dank: E.Marsman/D.Piron/  
H.v.Zuijlen (Waterschap Rivierenland),  
C. Uijterlinde (STOWA), M.v.Loosdrecht  
(TU Delft), J.Knoben/P.Geurtsen  
(RU-Bedrijfseconomie). Financiering:  
ERC-PoC(713533) & SIAM (NWO-Zwaarte-  
kracht 024.002.002).

uitwijzen hoeveel lachgasproductie plaatsvindt in een reële afvalwateropstelling.

### Toekomstperspectief

Een technologie die vanuit investeringsoogpunt niet interessant is kan dat in de toekomst wel zijn. Niet alleen in economisch opzicht, maar ook vanwege wijzigingen in wet- en regelgeving rondom milieubeheer. Op dit moment vindt een herziening plaats van de waterschapsbelastingen, waaronder de zuiveringsheffing. Nitriet en nitraat zijn hierin nog niet meegenomen. Deze stoffen zijn wel opgenomen in de herziene heffingsformule. Dit kan gevolgen hebben voor afvalwaterzuiveringsinstallaties. Daarnaast is er een groeiend bewustzijn over de daadwerkelijke bijdrage van methaan aan het broeikas-effect. Methaan is geen onderdeel van het Europese emissiehandelssysteem en industrieën hoeven hun methaanuitstoot niet te registreren. Dit kan in de nabije toekomst veranderen. Steeds meer landen en regio's introduceren een vorm van CO<sub>2</sub>-beprijzing of belasting en het is te verwachten dat wetgeving strenger wordt om milieu- en klimaatdoelstellingen te halen. De hoge CO<sub>2</sub>-prijzen die in deze business cases zijn getest kunnen de komende tien tot twintig jaar realistisch worden. De gecombineerde PNA/DAMO-techniek heeft in de geteste scenario's economische potentie en is daarmee een toekomstbestendige techniek.

Monique Slegers, Francisca Maalcke-Luesken,  
Mike Jetten (*Radboud Universiteit-Microbiologie*),  
Tim Hendrickx, Carla Frijters (*Paques BV*),  
Richard Haarhuis (*Waterstromen B.V.*)

### Referenties

Aalbers, R, Renes, G, Romijn, G (2016). WLO-klimaatscenario's en de waardering van CO<sub>2</sub>-uitstoot in MKBA's. Centraal Planbureau, Den Haag.

STOWA (2016) Reductie van methaanemissie in de afvalwater- en slibketen. STOWA 2016-09.

Kartal, B, Kuenen, JG, Van Loosdrecht, MCM (2010) Sewage treatment with anammox. *Science* 328 (5979), pp.702-703.

Van Kessel, MAHJ, Stultiens, K, Slegers, MFW, Guerrero Cruz, S, Jetten, MSM, Kartal, B, Op den Camp, HJM (2018) Current perspectives on the application of N-damo and anammox in wastewater treatment. *Current Opinion in Biotechnology* 50, pp.222-227.

### SAMENVATTING

Het effluent van anaerobe processen waarin biogas geproduceerd wordt bevat ammonium en opgelost methaan, een sterk broeikasgas. Een nieuwe biologische afvalwaterbehandelingstechniek voor dit effluent die twee biologische processen combineert – partiële nitritatie-anammox (PNA) en denitrificatie gekoppeld aan anaerobe methaanoxidatie (DAMO) – is een veelbelovende techniek om het energieverbruik en de CO<sub>2</sub>-uitstoot verder te reduceren en tegelijkertijd het stikstofverwijderingsrendement te verhogen. In twee business cases is een aantal (prijs)scenario's doorgerekend om de economische potentie van PNA/DAMO te verkennen. Er is economische potentie wanneer strengere stikstofnormen gehanteerd worden of CO<sub>2</sub>-prijzen stijgen.

Afvalwater:  
verwijderen  
stikstof en  
methaan