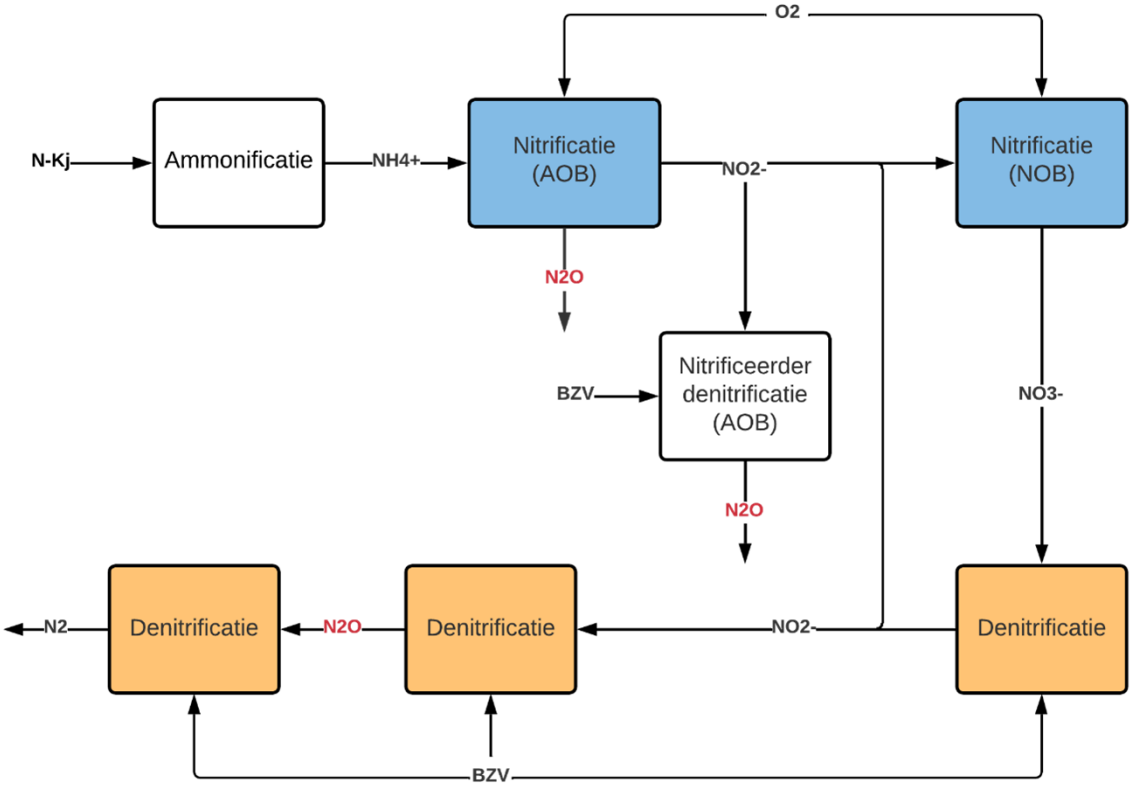
Lachgasmetingen op de rioolwaterzuivering

Floris de Heer, Birk Houtman (IMD), Ernst Miltenburg (Waterschap Vallei en Veluwe), Maaike Hoekstra (Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier)

Waterschappen hebben de ambitie om in 2035 klimaatneutraal te zijn. De emissie van broeikasgassen uit de rioolwaterzuiveringsinstallaties is daarbij een belangrijke parameter. Op steeds meer zuiveringen worden de emissies van lachgas uit de waterlijn gemeten. Zo ook op de zuiveringen Apeldoorn en Zaandam-Oost. Op deze zuiveringen is onderzocht hoeveel de plaats uitmaakt waar de sensoren opgehangen worden. Zo is er gemeten in de aerobe en anoxische zones van de beluchtingstank, op verschillende locaties binnen die zones en op verschillende dieptes in de beluchtingstank. Ook zijn de lachgasconcentraties in de beluchtingstank vergeleken met die in de nabezinktank.

Lachgas (distikstofoxide, N_2O) is een sterk broeikasgas en komt via verschillende routes in de atmosfeer. Het komt vrij in de landbouw, het verkeer, in veenweidegebieden en bij biologische afvalwaterzuiveringen. Er wordt nog gezocht naar een betrouwbaar beeld van de huidige emissies en de mogelijkheden tot reductie van de uitstoot. In sommige gevallen vormt de uitstoot van lachgas het overgrote deel van de CO_2-voetafdruk van een rwzi [1].
De uitstoot van broeikasgassen wordt uitgedrukt in CO_2-equivalenten, wat wil zeggen dat de uitstoot van deze gassen wordt omgerekend naar de grootte van de bijdrage van koolstofdioxide aan het broeikaseffect. Lachgas is 265 keer sterker dan CO_2 [2]. Inschattingen van het Panel voor Klimaatverandering (IPCC), aan de hand van kentallen uit beperkte datasets, komen op een emissie van 1,6% lachgas per massa-eenheid stikstof in het inkomende afvalwater [3]. Deze emissiefactor staat momenteel ter discussie, met 1,1% als nieuw voorstel [4].
Daarnaast wordt gesteld dat er niet kan worden uitgegaan van een algemene emissiefactor voor rwzi's, omdat de onderlinge verschillen groot kunnen zijn. Daarom zijn de waterschappen in 2023 het Versnellingsprogramma Lachgas gestart. Het doel van dit programma is om de lachgasemissies uit verschillende types zuiveringen in kaart te brengen en de mogelijkheden voor reductie te onderzoeken.
Lachgas kan op verschillende manieren worden gevormd tijdens de stikstofverwijdering in het zuiveringsproces. In Afbeelding 1Afbeelding 1 zijn de meest voorkomende manieren weergegeven.



Afbeelding 1. Versimpelde weergave van de metabole routes van lachgasvorming

Een van de manieren om lachgasemissies te bepalen is het meten van de concentratie lachgas in het afvalwater. Hiertoe worden sensoren direct in het afvalwater geplaatst, meestal van de beluchtingstank. Vervolgens kunnen uit de concentraties de emissies (naar de atmosfeer) worden berekend. Lachgas kan zowel in de nitrificatie als in de denitrificatie worden gevormd (zoals in afbeelding 1 te zien). Daarom is het in ieder geval nodig om zowel in de aerobe als anoxische zone van de beluchtingstank (of aeratietank, AT) te meten. Een logische vervolgvraag is echter hoe groot de ruimtelijke verschillen in lachgasconcentratie zijn binnen die zones, zodat de gemeten concentraties kunnen worden geëxtrapoleerd naar een concentratie en emissie van de gehele tank.

In 2024 zijn er verschillende monitoringscampagnes geweest. In dit artikel worden de resultaten behandeld van metingen op de rwzi's Apeldoorn (Waterschap Vallei en Veluwe) en Zaandam-Oost (Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier). In dit onderzoek is een groot aantal lachgassensoren op meerdere plekken langs de stromingsrichting geplaatst, in zowel de aerobe als de anoxische zone. Op die manier is onderzocht of er over de lengte van de beluchtingstank een concentratiegradiënt zou zijn en – zo ja – hoe die eruit zou zien. Dit is gebeurd voor een periode van meerdere maanden.

Daarnaast is onderzocht of er een lachgasconcentratiegradiënt aanwezig is in de diepterichting van de aerobe en anoxische zone. Dit onderzoek heeft voor enkele weken plaatsgevonden, alleen op rwzi Apeldoorn.

De huidige (impliciete) aanname bij veel onderzoeken naar lachgas is dat zowel de productie als de emissie van lachgas op een rwzi voornamelijk plaatsvindt in de beluchtingstank. Om te onderzoeken of er ook op andere locaties lachgas wordt gevormd, zijn er ook tijdelijk lachgasmetingen gedaan in een nabezinktank (NBT) van rwzi Apeldoorn.

Materiaal & Methode

Om de lachgasconcentratiegradiënten te onderzoeken is gebruik gemaakt van lachgassensoren voor de vloeistoffase (van Unisense Environment).

Rwzi Apeldoorn (afbeelding 2)

Communale afvalwaterzuivering met nitrificatie en denitrificatie in twee parallelle gemodificeerde University of Cape Town-reactoren (mUCT's), met een anaerobe selector, een anoxische zone en een aerobe zone voorzien van bellenbeluchting.

In afbeelding 2 zijn de meetlocaties weergegeven die zijn onderzocht in een beluchtingstank van rwzi Apeldoorn. Er is niet op al deze posities tegelijkertijd gemeten. Op één locatie (de referentie) is wél over de gehele onderzoeksperiode gemeten, op elk van de andere posities slechts een gedeelte van de tijd. De sensoren zijn doorgaans na 1 à 2 maanden verplaatst naar andere posities.

Rwzi Zaandam-Oost (afbeelding 3)

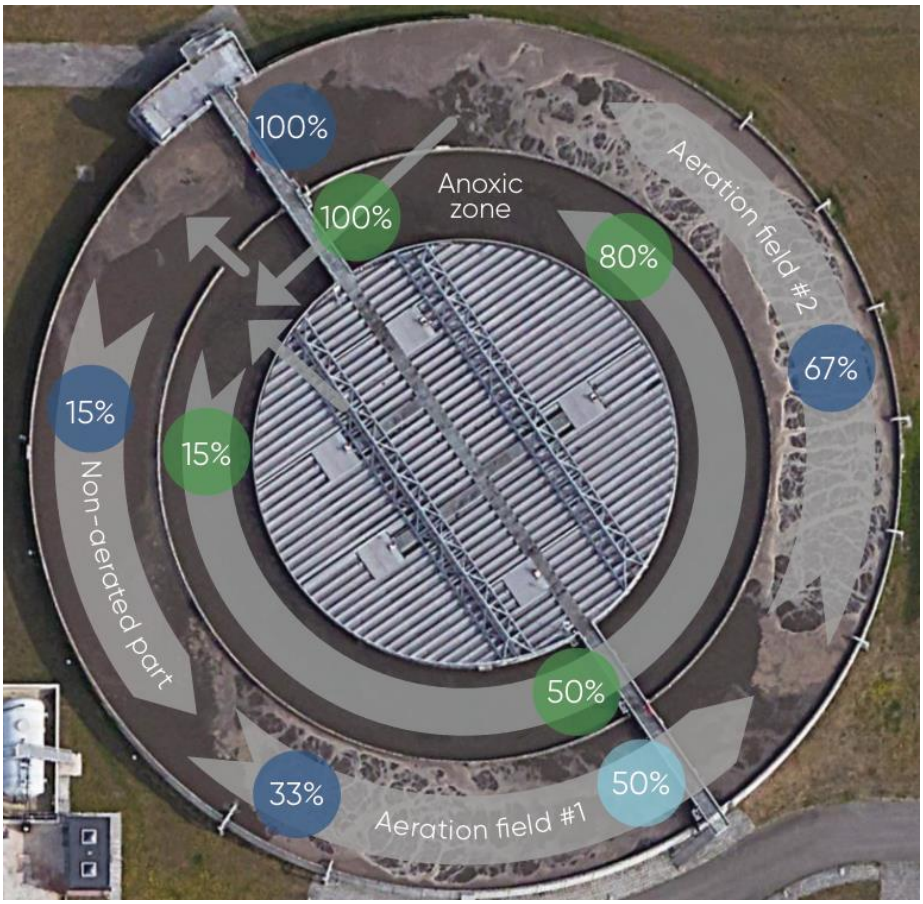
Communale afvalwaterzuivering met nitrificatie en denitrificatie, bestaande uit één mUCT-reactor met een korte verblijftijd en een carrouselreactor met vier beluchte benen. Beide reactoren beschikken over bellenbeluchting.

In afbeelding 3 zijn de meetlocaties die zijn onderzocht in de carrouselreactor van rwzi Zaandam-Oost weergegeven. Op rwzi Zaandam-Oost is de gehele periode op alle vier de posities tegelijkertijd gemeten.

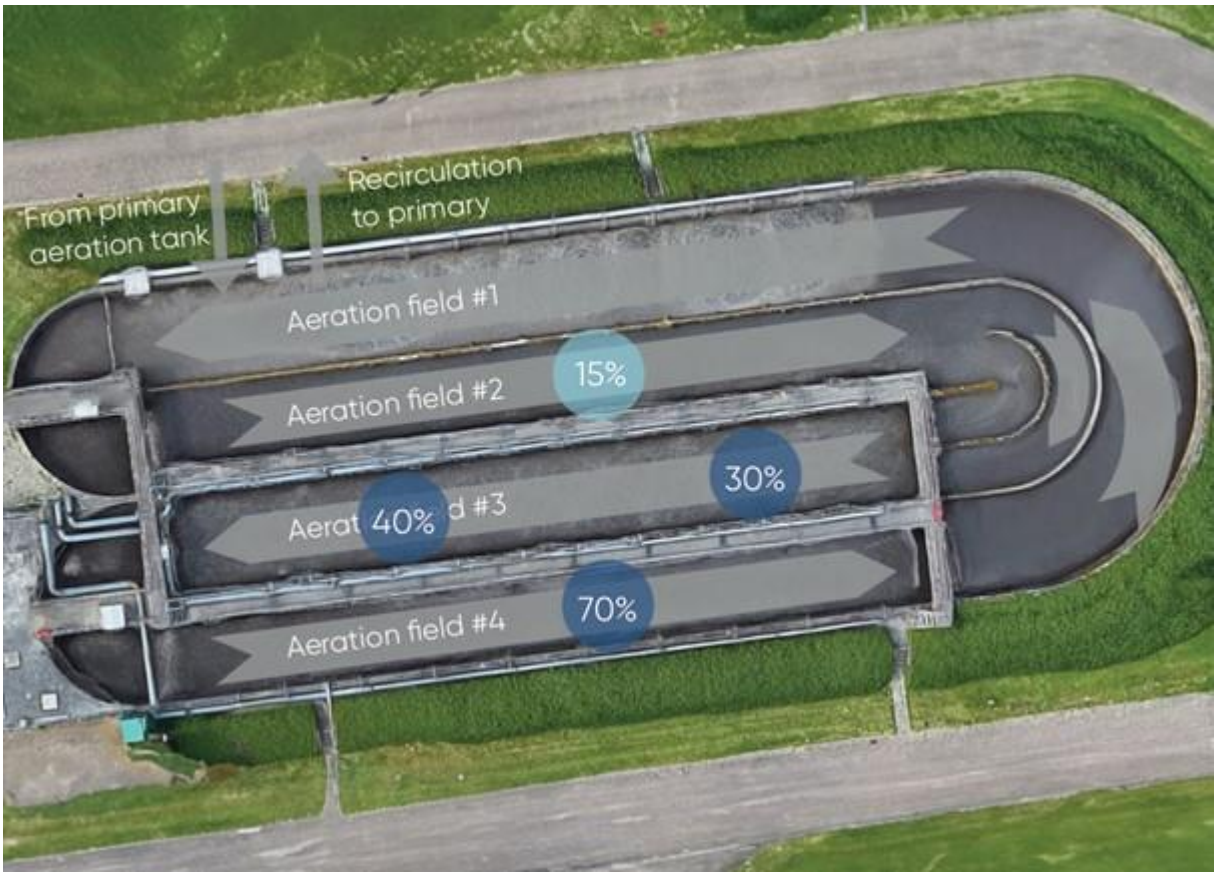
Lachgasmetingen

Om de lachgasconcentratiegradiënten in de diepterichting te onderzoeken, zijn er metingen op verschillende dieptes uitgevoerd in zowel de anoxische als de aerobe zone van een beluchtingstank van rwzi Apeldoorn. In de aerobe zone is halverwege de aerobe ring (‘50%’) op twee verschillende dieptes gemeten, voor een periode van 7 dagen. In de anoxische zone is aan het einde van de anoxische ring (‘100%’) op twee verschillende dieptes gemeten, voor een periode van 12 dagen. In beide zones is met één lachgassensor net onder het wateroppervlak (zoals de sensoren meestal worden toegepast) en één lachgassensor op 3 meter diepte gemeten.

Voor het bepalen van de lachgasvorming in de nabezinktanks (NBT's), is er op twee plekken in een NBT gemeten: in de inlooptrommel en in de bezinkingsruimte, dat wil zeggen het voornaamste deel van de NBT. In de bezinkingsruimte is er ongeveer halverwege de lengte tussen de inlooptrommel en de aflaat van de NBT gemeten. Er is van 4 juli tot 24 september 2024 (82 dagen) gemeten. De gemeten concentraties (in de waterfase) in de NBT zijn omgerekend naar emissies (naar de atmosfeer). De emissies zijn bepaald met de emissieberekeningen die de producent van de lachgassensoren (Unisense Environment) voorschrijft [5].



Afbeelding 2. Meetlocaties op AT1 van rwzi Apeldoorn. Groen: lachgassensoren in de anoxische zone, blauw: lachgassensoren in de aerobe zone. Lichtblauw: referentiesensor. De percentages duiden op de locatie van de sensor in de gegeven zone in de stromingsrichting (dus 33% is op 1/3 vanaf de instroom van de gegeven zone)



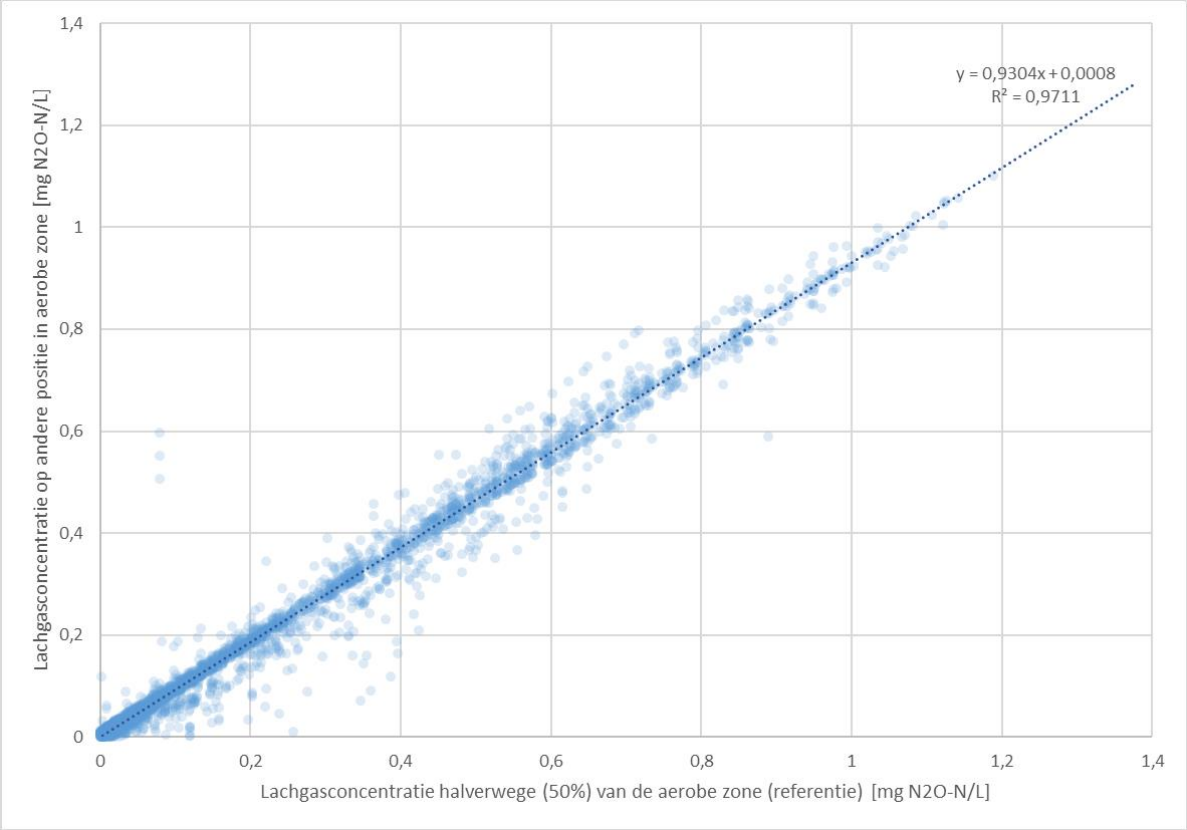
Afbeelding 3. Meetlocaties op AT2 van rwzi Zaandam-Oost. Lichtblauw: referentiesensor. De percentages duiden op de locatie van de sensor in de tank in de stromingsrichting

Resultaten en discussie

Gradiënten in stromingsrichting – aerobe zone

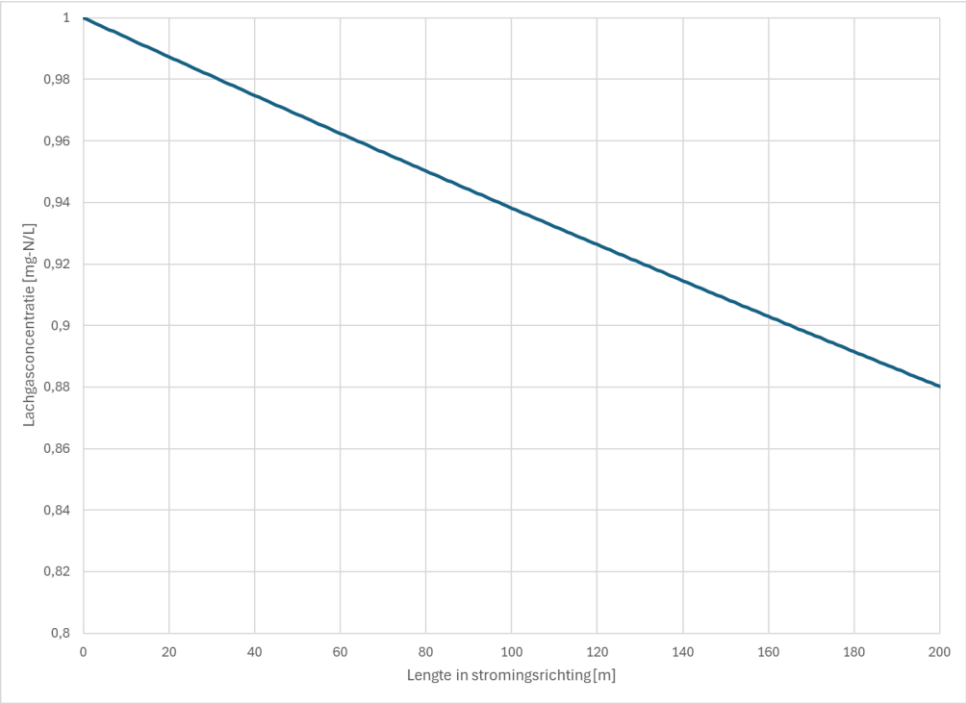
De metingen langs de stromingsrichting van de aerobe zone gaven zeer vergelijkbare lachgasconcentraties aan, ongeacht of de sensor in een belucht of onbelucht deel van de aerobe zone waren gepositioneerd. In Afbeelding 4 zijn de resultaten voor rwzi Apeldoorn weergegeven. Op de x-as zijn de concentraties van de positie uitgezet die als referentie is aangemerkt (lichtblauwe cirkel met 50%). Op de y-as zijn de concentraties uitgezet van de sensoren op de andere meetposities. In een perfect homogene concentratieverdeling zouden de punten op een rechte lijn liggen waarvan de richtingscoëfficiënt gelijk is aan 1 en de asafsnede aan 0, oftewel y = x. Dit is nagenoeg het geval.

Op rwzi Zaandam-Oost werden zeer vergelijkbare resultaten gevonden. Deze zijn hier niet opgenomen, maar zijn wel te vinden in de uitgebreide versie van dit artikel in de Hydrotheek.



Afbeelding 4. Correlatie tussen uurgemiddelde lachgasconcentraties gemeten op verschillende posities in de beluchte zone van een AT van rwzi Apeldoorn

De gevonden homogene concentratieverdelingen in de aerobe zones kan (gedeeltelijk) worden verklaard door het gegeven dat lachgas goed oplosbaar is in water. De toegepaste beluchting maakt niet dat de lachgasconcentratie in een beluchtingsveld sterk daalt. De invloed van de emissie op het verloop van de lachgasconcentratie kan ook worden gemodelleerd. De resultaten daarvan zijn weergegeven in afbeelding 5. Hiermee wordt bevestigd dat het effect van de emissie op het verloop van de lachgasconcentratie (in de stromingsrichting) slechts beperkt is.



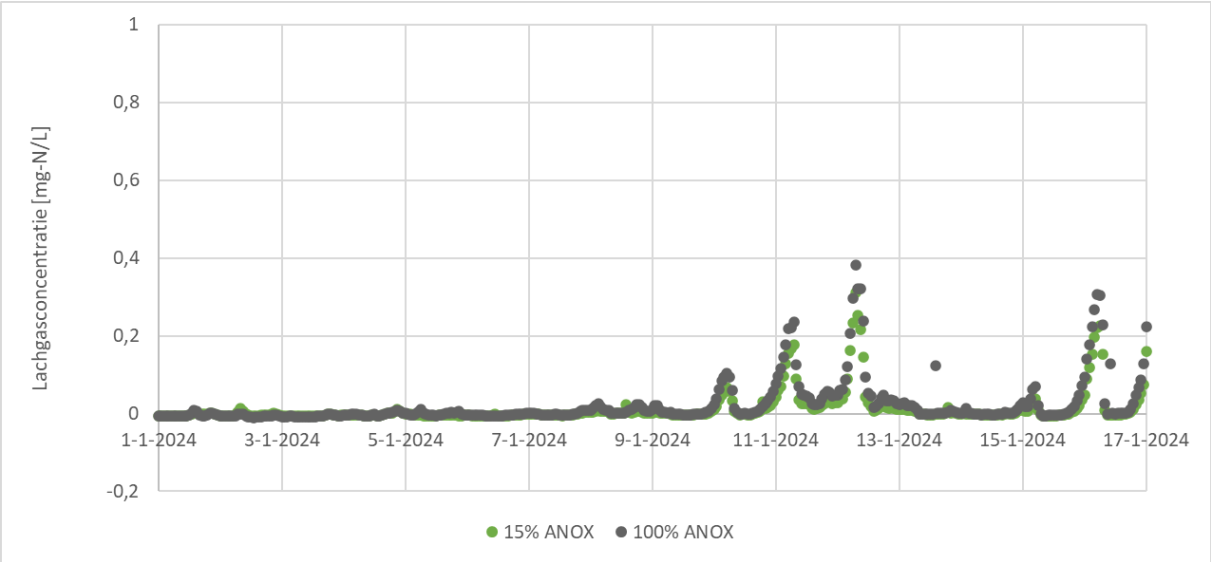
Afbeelding 5. Gemodelleerd verloop van de lachgasconcentratie onder invloed van uitsluitend emissie (dus geen productie). Uitgaande van de dimensies van een AT van rwzi Apeldoorn, een luchtdebiet van 5000 Nm^3/uur, een temperatuur van 20 °C en een stroomsnelheid van 0,3 m/s

Gradiënten in stromingsrichting – anoxische zone

In de anoxische zone liggen de lachgasconcentraties vaak veel lager dan in de aerobe zone. Als de meetwaarde onderin het meetbereik van de sensor ligt, worden met name de verschillen tussen de meetdata van de verschillende sensoren minder duidelijk en betrouwbaar. Gedurende de onderzoeksperiodes zijn er echter momenten geweest waarin verhoogde lachgasconcentraties werden gemeten in de anoxische zone, waardoor de concentratiegradiënt goed kan worden bepaald.

In die gevallen bleek dat de lachgasconcentratieverdeling in de anoxische zone vaak bijna homogeen is: de verschillen tussen de concentraties op de verschillende posities waren meestal klein. Een representatief deel van de resultaten voor de anoxische zone zijn weergegeven in Afbeelding 6.

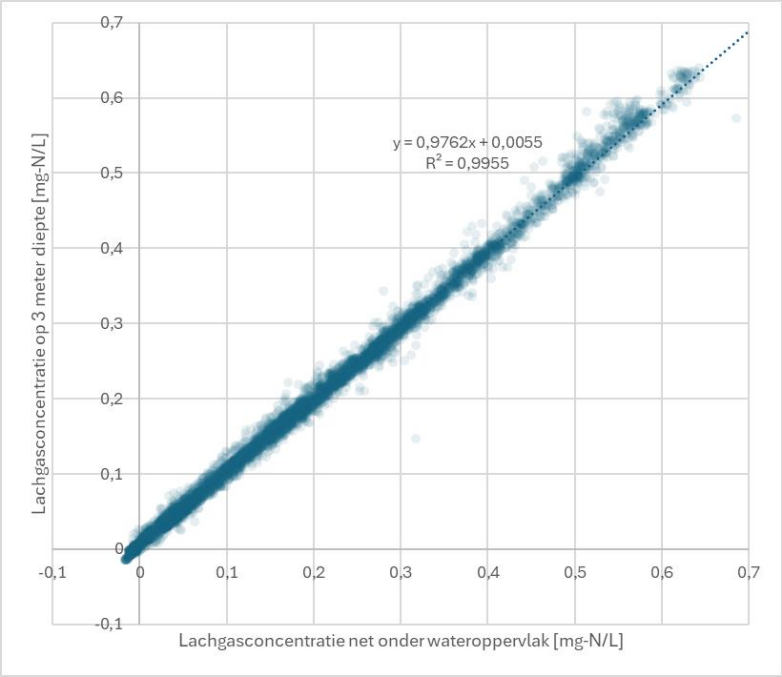
De denitrificatie kan op twee manieren invloed hebben op de lachgasconcentratie: (1) bij onvolledige denitrificatie zal vooral de laatste stap van de denitrificatie minder plaatshebben, de omzetting van lachgas in stikstofgas (zie afbeelding 1). Zodoende kan er gedurende de denitrificatie lachgas ontstaan. Mogelijk is dit de oorzaak van de lichte toename van de lachgasconcentratie met de stromingsrichting die te zien is in afbeelding 6. (2) denitrificeerders kunnen echter ook lachgas omzetten in stikstofgas (omzetting N_2O in N_2, zie ook Afbeelding 1). Dit kan lachgas zijn die zij zelf hebben gevormd, maar kan ook door nitrificeerders zijn aangemaakt (en via de interne recirculatie in de anoxische zone beland). Denitrificeerders kunnen dus zowel lachgas (netto) produceren als consumeren.



Afbeelding 6. Representatief beeld van de lachgasconcentratieverdeling in de anoxische zone van een AT van rwzi Apeldoorn. De lachgasconcentratie stijgt lichtjes met de stromingsrichting

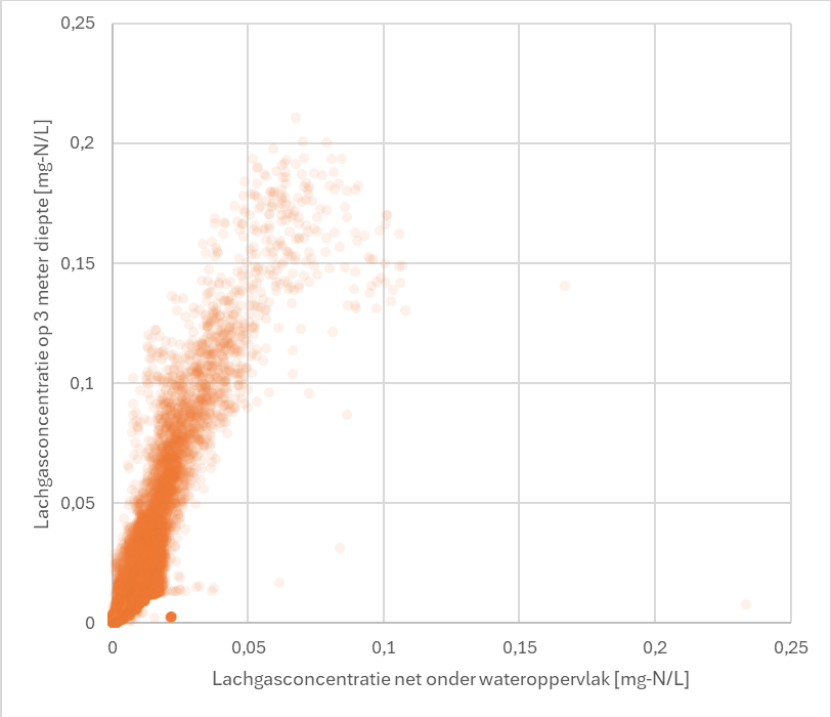
Gradiënten in diepterichting

Voor een periode van 7 dagen is op verschillende dieptes in de aerobe zone lachgas gemeten. De relatie tussen de gemeten concentraties op beide plekken is weergegeven in Afbeelding 7. Net onder het wateroppervlak en op 3 meter diepte werden nagenoeg gelijke concentraties gemeten. Er is blijkbaar een grote mate van menging in de diepterichting. Dit is waarschijnlijk het gevolg van de bellenbeluchting.



Afbeelding 7. De lachgasconcentratie in de aerobe zone (positie 50%), gemeten op 3 m diepte uitgezet tegen de concentratie gemeten net onder wateroppervlak. Voor de plot zijn minuutwaarden voor de lachgasconcentraties gebruikt. Deze zijn niet gecorrigeerd voor negatieve meetwaarden

In de anoxische zone ziet het verband tussen de lachgasconcentratie net onder het wateroppervlak en op 3 meter diepte er heel anders uit (zie Afbeelding 8). De concentratie op 3 meter diepte is in vaak hoger dan die net onder het wateroppervlak.



Afbeelding 8. De lachgasconcentratie in de anoxische zone (positie 100%), gemeten op 3 m diepte uitgezet tegen de concentratie gemeten net onder wateroppervlak

De reden voor de hogere lachgasconcentraties op 3 meter diepte zou kunnen zijn dat de recirculatie vanuit de aerobe zone naar de anoxische zone ook op 3 meter diepte wordt ingelaten. Er is reden om aan te nemen dat het overgrote deel van het lachgas gemeten in de anoxische zone van rwzi Apeldoorn afkomstig is uit de aerobe zone (zie verderop). Als dat inderdaad zo is, zou dat de hogere lachgasconcentratie op 3 meter diepte kunnen verklaren. Het recirculatiedebiet kan dus een parameter zijn die invloed heeft op de opgeloste lachgasconcentratie. In tegenstelling tot de aerobe zone, vindt er in de anoxische zone blijkbaar weinig menging plaats in verticale richting, waarschijnlijk omdat er niet wordt belucht.

Verhouding anoxische en aerobe zone

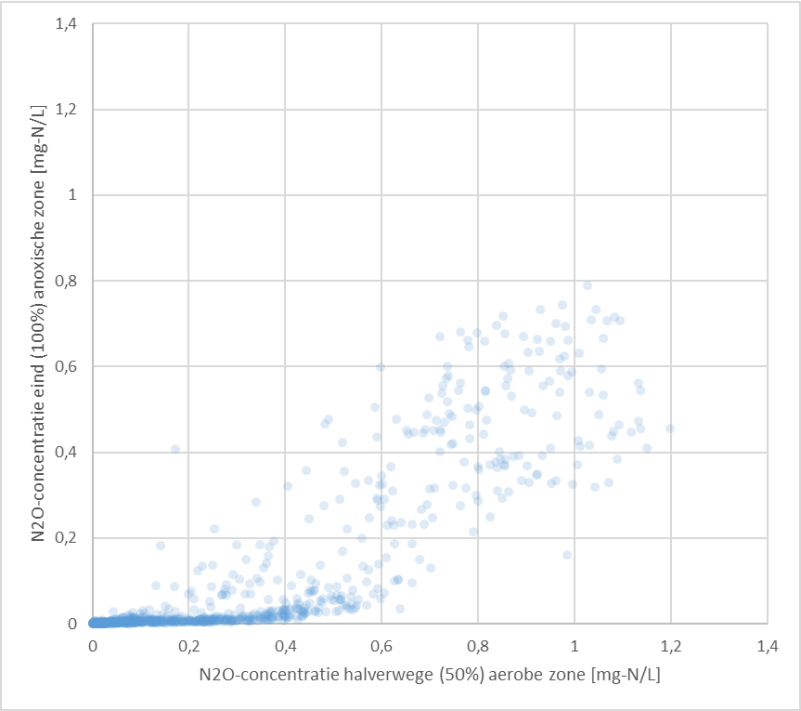
De anoxische en aerobe zone zijn doorgaans op twee manieren onderling verbonden: door de doorstroming van de anoxische naar de aerobe zone, en door de retournering van de aerobe zone naar de anoxische zone. Dit werpt de vraag op of er verbanden bestaan tussen de lachgasconcentraties in beide zones.

In Afbeelding 9 is de lachgasconcentratie in de anoxische zone uitgezet tegen die in de aerobe zone. Zichtbaar is dat de lachgasconcentratie in de anoxische zone nooit hoog is als de concentratie in de aerobe zone dat niet is (er liggen vrijwel geen datapunten boven de lijn y = x). Dit gegeven sluit aan op de bevinding dat op 3 meter diepte in de anoxische zone (d.w.z. de diepte van de inlaat van de retourstroom) hogere lachgasconcentraties werden aangetroffen dan net onder het wateroppervlak. Het lachgas in de anoxische zone lijkt voornamelijk afkomstig te zijn uit de aerobe zone.

Daarnaast zijn er in de plot twee patronen zichtbaar:

- Een lijn die plat op de x-as ligt. Deze lijn begint bij de oorsprong en houdt op bij een bepaalde waarde van de lachgasconcentratie in de aerobe zone (~0,4 mg-N/L). Dit correspondeert met lachgas in de aerobe zone die niet terugkomt in de anoxische zone.
- Een lineair toenemende lijn met grote spreiding, die (gemiddeld genomen) oploopt vanaf een positieve waarde voor de concentratie in de aerobe zone (~0,3 mg-N/L).

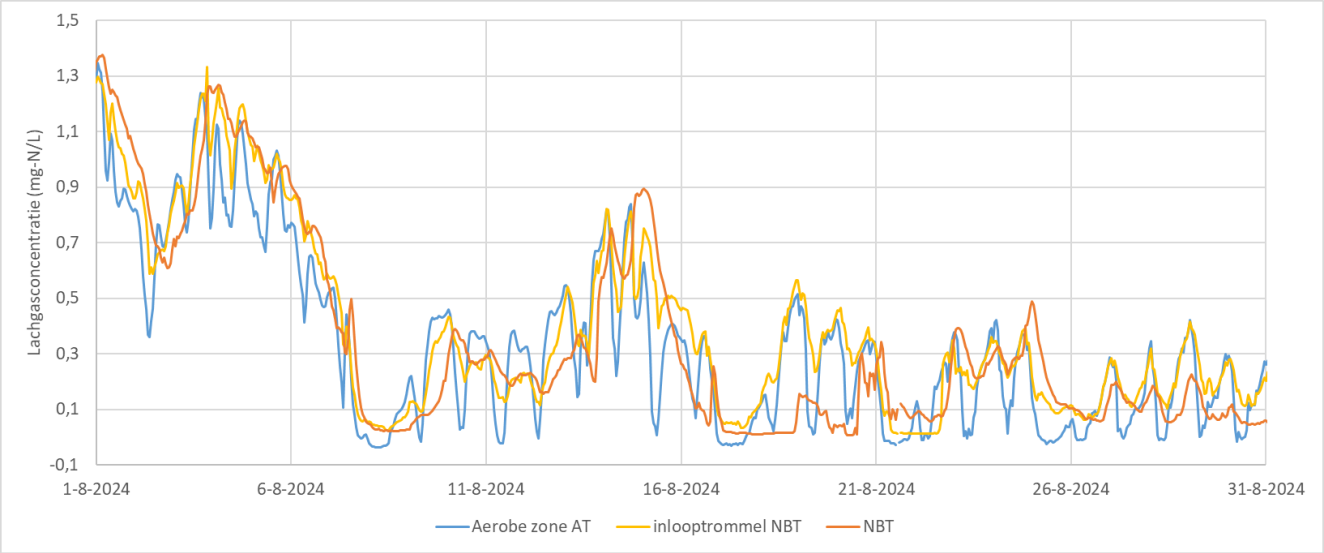
Deze patronen doen vermoeden dat lage lachgasconcentraties in de aerobe zone vaak nog wel kunnen worden geconsumeerd (gedenitrificeerd) in de anoxische zone, terwijl dit bij hogere lachgasconcentraties niet meer volledig lukt.



Afbeelding 9. Lachgasconcentratie in de anoxische zone van een AT van rwzi Apeldoorn uitgezet tegen die in de aerobe zone. Voor de plot is gebruik gemaakt van uurgemiddelde concentraties, in de periode 8-12-2023 t/m 17-1-2024 (40 dagen)

Nabezinktanks en effluent

In afbeelding 10 zijn de lachgasconcentraties in een beluchtingstank (AT) en een nabezinktank (NBT) van rwzi Apeldoorn uitgezet tegen de tijd. De aerobe zone bevindt zich net voor de aflaat naar de nabezinktanks. Binnen de NBT is op twee posities gemeten: in de inlooptrommel en in de bezinkingsruimte (het voornaamste deel van de NBT).



Afbeelding 10. Lachgasconcentraties tegen de tijd in de aerobe zone van een AT van rwzi Apeldoorn en een nabezinktank die op die AT volgt

De concentratie in de NBT volgt de concentratie in de AT, maar wijkt soms ook af. In de NBT zijn de lachgasconcentraties vaak gedempt en vertraagd ten opzichte van de concentraties in de AT. De demping of uitvlakking kan worden verklaard door het grote volume in de NBT's, waardoor het lachgas verdund raakt. Daarnaast ligt op sommige momenten de lachgasconcentratie in de NBT duidelijk lager dan in de AT en op andere momenten weer hoger. In beide gevallen vinden er blijkbaar nog stikstofomzettingen plaats in de NBT, waarschijnlijk denitrificatie.

De gemeten concentraties (in water) kunnen worden omgerekend naar emissies (naar de atmosfeer). Er zijn aparte formules beschikbaar voor de anoxische zone van een AT, die hier zijn toegepast op de NBT. Er is geprobeerd te corrigeren voor het verschil tussen de anoxische zone van een AT en een NBT door een lage massa-overdrachtscoëfficiënt aan te nemen.

Uit de emissieberekening volgt een lachgasemissie van gemiddeld 3,6 kg N_2O-N/dag voor deze NBT. Als deze emissie wordt geëxtrapoleerd naar alle 9 NBT's op rwzi Apeldoorn en omgezet naar CO_2-equivalenten, levert dat een emissie op van ongeveer 406 ton CO_2-equivalent per maand. Tijdens de twee maanden van de meetperiode op de NBT was de uitstoot van de AT's rond de 1100 ton CO_2-eq per maand. Als de aannames kloppen, betekent dit dat de NBT's nog ongeveer 37% extra uitstootten bovenop de emissie van de AT's. De uitstoot uit nabezinktanks kan dus zeker significant zijn.

Conclusie

Uit het onderzoek op de rwzi's Apeldoorn en Zaandam-Oost komt een aantal interessante bevindingen naar voren. Ten eerste lijkt de locatie van de lachgassensoren (in de stromingsrichting) weinig verschil te maken, zowel in aerobe als in anoxische zones van een beluchtingstank. De verwachting is dat in veel omloopsystemen de menging in de tanks zodanig is dat één enkele sensor voldoende is om een juist beeld te verkrijgen van de lachgasvorming in een gegeven zone.

Uit de metingen op verschillende dieptes bleek dat de lachgasconcentratie in de diepterichting in de aerobe zone homogeen is verdeeld. In de anoxische zone bleken wel grote verschillen te kunnen voorkomen, waarschijnlijk als gevolg van de positie van de inlaat van de recirculatiestroom. Daarom is de aanbeveling om bij de plaatsing van de lachgassensoren wel aandacht te hebben voor de positie van de inlaat van de verschillende stromen in de AT.

Uit de metingen in een nabezinktank op rwzi Apeldoorn werd duidelijk dat ook daar opgelost lachgas aanwezig kan zijn, en dat de concentratie in deze tank sterk samenhangt met de concentraties in de voorgeschakelde beluchtingstank. Als ervan kan worden uitgegaan dat de emissieberekeningen voor de anoxische zone van een AT toepasbaar zijn op een NBT, leveren NBT's een significante bijdrage aan de lachgasuitstoot van een rwzi.

In de Hydrotheek van de STOWA is een uitgebreidere versie van dit artikel te vinden [6].

Referenties

1. Yao, et al. (2022). 'Contribution of nitrous oxide to the carbon footprint of full-scale wastewater treatment plants and mitigation strategies- a critical review'. *Environmental pollution*. Volume 314. Doi:https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120295
2. Myhre, G.et al. (2013). *Anthropogenic and Natural Radiative Forcing.* IPCC - Cambridge University Press. https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_Chapter08_FINAL.pdf, geraadpleegd op 5 mei 2025
3. IPCC. (2019). *Chapter 6: Wastewater treatment and discharge. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.* IPCC. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/5_Volume5/19R_V5_6_Ch06_Wastewater.pdf, geraadpleegd mei 2025
4. Haas, D. d., & Andrews, J. (2022). 'Nitrous oxide emissions from wastewater treatment - Revisiting the IPCC 2019 refinement guidelines'. *Environmental challenges*, Volume 8. doi:https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100557
5. Baresel, C., Andersson, S., Yang, J., & Holmen Andersen, M. (2016). 'Comparison of nitrous oxide (N2O) emissions calculations at a Swedish wastewater treatment plant based on water concentrations versus off-gas concentrations'. *Advances in Climate Change Research*. Volume 7. Issue 3. Pages 185-191
6. Heer, de. (2025). *Lachgas gemeten op diverse locaties op de rioolwaterzuiveringen Apeldoorn en Zaandam-Oost*. https://library.wur.nl/WebQuery/hydrotheek/2349320