

ERVARINGEN VANUIT DE COMMUNITY OF PRACTICE OVER DE EMISSIE VAN LACHGAS VANUIT RIOOLWATERZUIVERINGS- INSTALLATIES



RAPPORT

2023
33

ERVARINGEN VANUIT DE COMMUNITY OF PRACTICE OVER DE EMISSIE VAN
LACHGAS VANUIT RIOOLWATERZUIVERINGSINSTALLATIES

RAPPORT

2023

33

ISBN 978.94.6479.031.3



stowa@stowa.nl www.stowa.nl

TEL 033 460 32 00

Stationsplein 89 3818 LE Amersfoort

POSTBUS 2180 3800 CD AMERSFOORT

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

COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
Postbus 2180
3800 CD Amersfoort

PROJECTUITVOERING

Eline Gootzen, Royal HaskoningDHV
Maxime van Wiggen, Royal HaskoningDHV
Jimmy van Opijnen, Royal HaskoningDHV
Ellen van Voorthuizen, Royal HaskoningDHV

BEGELEIDINGSCOMMISSIE

Remmie Neef, Waterschap Zuiderzeeland
Alexandra Deeke, Waterschap De Dommel
Marcel Zantvoort, Waternet
Robert Kras, Waterschap Aa en Maas
Sybren Gerbens, Wetterskip Fryslân
Cora Uijterlinde, STOWA

DANK AAN De bij het CoP aangesloten waterschappen. Door hun inspanningen om de mate van lachgasemissies te meten is veel inzicht verkregen in wat belangrijk is om tot een betrouwbare meting te komen en welke maatregelen de emissie kan verlagen. Dank dat zij hun data en ervaringen voor dit rapport hebben willen delen.

VORMGEVING Buro Vormvast

FOTO'S OMSLAG Bron: Royal HaskoningDHV

STOWA STOWA 2023-33

ISBN 978.94.6479.031.3

Copyright Teksten en figuren uit dit rapport mogen alleen worden overgenomen met bronvermelding.

Disclaimer Deze uitgave is met de grootst mogelijke zorg samengesteld. Niettemin aanvaarden de auteurs en de uitgever geen enkele aansprakelijkheid voor mogelijke onjuistheden of eventuele gevolgen door toepassing van de inhoud van dit rapport.

TEN GELEIDE

ONDERZOEK NAAR LACHGASEMISSIES VANUIT RWZI'S KOMT OP STOOM

Tien jaar na het eerste onderzoek naar de emissie van lachgas vanuit Nederlandse zuiveringen is in 2019 een CoP Lachgas opgericht. Het CoP heeft sterk bijgedragen aan een versnelling van het lachgasonderzoek in Nederland. Anno 2023 wordt op meer dan 15 zuiveringen lachgas gemeten en staan er nog vele op de planning. In de ruim twee jaar dat het CoP nu bestaat is veel kennis en ervaring opgedaan. Reden om al deze lessen en ervaringen samen te vatten en te delen, zodat op een uniforme wijze lachgas bepaald kan blijven worden en inzicht wordt verkregen in de mogelijkheden om de emissie van lachgas te reduceren.

Naast dat het rapport een overzicht geeft van de geleerde lessen en ervaringen, kan het rapport ook gebruikt worden als een stappenplan voor het opzetten van een lachgasmeet-campagne. De eerste stap daarin is het inventariseren van het risico op lachgasemissies. Dit kan op een eenvoudige wijze gedaan worden aan de hand van jaar- of maandgemiddelde ammonium- en nitrietconcentraties in het effluent. Aan de hand van deze inventarisatie kan één of meerdere zuiveringen geselecteerd worden waar de emissie van lachgas daadwerkelijk gemeten wordt. Om tot betrouwbare data te komen is in het rapport ingegaan op: de te gebruiken meetapparatuur, het selecteren van de juiste locatie in de zuivering om deze apparatuur te plaatsen, het beheer en onderhoud van de apparatuur en het verwerken en omzetten van data. Tot slot is aan de hand van een overzicht uit academisch en praktijkonderzoek in Nederland een lijst van mogelijke reductiemaatregelen geïnventariseerd. Uit deze inventarisatie is gebleken dat het beheersen van de zuurstofconcentratie in de aerobe en anoxische zones van een zuivering belangrijk is om de emissie van lachgas te beheersen. Dit geldt mogelijk ook voor het beheersen van de slibconcentratie, de CZV/N verhouding, RWA omstandigheden en de ammoniumconcentratie in de zuivering.

Nader onderzoek is nodig om inzicht te krijgen hoe en in welke mate bovengenoemde parameters invloed hebben op de mate van emissie en hoe hier in het ontwerp en het beheer van een zuivering dan rekening mee kan worden gehouden. Dit onderzoek kan plaats vinden in het versnellingsprogramma dat anno 2023 door de waterschappen wordt vormgegeven. De uitkomsten van dit programma zullen gebruikt worden om de ambities van de waterschappen om in 2035 "CO₂ neutraal" te zijn in te vullen.

Joost Buntsma
Directeur STOWA

SAMENVATTING

INLEIDING EN DOELSTELLING

Nu de Nederlandse waterschappen bijna volledig zijn overgegaan op groene stroom is een grote stap gemaakt in het reduceren van de CO₂ voetafdruk van de afvalwaterzuiveringen. Naast het verbruik van chemicaliën vormen lachgas (en methaan voor zuiveringen met gisting) nu een groot deel van de CO₂ voetafdruk van de zuiveringen. Dit is ook aangetoond in de onderzoeken die tussen 2008 en 2012 zijn uitgevoerd¹. Deze onderzoeken hebben ook laten zien dat de emissie van lachgas echter sterk varieert (zowel in tijd als tussen verschillende rwzi's). Dit betekent dat er altijd metingen nodig zijn om de emissie op een zuivering vast te stellen. Om hier in de praktijk invulling aan te geven heeft STOWA eind 2019 een Community of Practice (CoP) Lachgas opgericht waar anno 2023 bijna alle waterschappen bij zijn aangesloten. Doel van het CoP is om kennis en ervaring over het meten en reduceren van de emissie van lachgas met elkaar te delen, zodat ook op een uniforme wijze de emissie van lachgas wordt bepaald. In 2023 wordt op meer dan 15 zuiveringen de omvang van de emissies bepaald en wordt gezocht naar maatregelen om deze te reduceren. Het CoP heeft hierin een belangrijke bijdrage geleverd en gezorgd voor een versnelling van het onderzoek naar de emissie van lachgas uit zuiveringsinstallaties. Aan het begin van een nieuwe versnelling die door de waterschappen in een versnellingsprogramma wordt vormgegeven zijn de opgedane kennis en ervaringen van de afgelopen jaren samengevat in voorliggend rapport.

AANPAK

Om uiteindelijk de emissie van lachgas te reduceren zijn de volgende stappen nodig:

1. Selecteren van één of meerdere zuiveringen aan de hand van een simpel risicomodel.
2. Meetcampagne van tenminste één jaar op één of meerdere zuiveringen om de omvang van de emissie te bepalen en inzicht te krijgen in de mogelijke maatregelen om deze te reduceren.
3. Selecteren van maatregelen om de emissie van lachgas te reduceren.

Het selecteren van zuiveringen kan worden uitgevoerd met een in 2019 ontwikkeld simpel risicomodel. Aan de hand van beschikbare data is in dit rapport een update gemaakt van dit model zodat op een meer accurate manier inzicht verkregen kan worden in het risico op lachgas. Let op, het model is alleen te gebruiken om zuiveringen te selecteren en om een eerste inzicht in de omvang van de emissie te krijgen, maar metingen zijn altijd nodig om deze daadwerkelijk vast te stellen. Bij het meten van lachgas is het belangrijk dat dit op een uniforme wijze gebeurt zodat zuiveringen onderling te vergelijken zijn en ook een betrouwbaar resultaat oplevert. In dit rapport is beschreven op welke wijze dit dient te worden ingevuld. Tot slot is in dit rapport een stand van zaken weergegeven met betrekking tot wat we nu weten op welke wijze de emissie van lachgas kan worden gereduceerd.

INSCHATTEN EMISSIE LACHGAS – SELECTEREN ZUIVERINGEN

Met de jaargemiddelde concentraties ammonium en nitriet en effluent kan het risico op lachgas van een zuivering worden ingeschat. Een zuivering heeft een hoog risico op lachgasvorming en emissie als de jaargemiddelde nitrietconcentratie in het effluent groter dan 0,25 mg N/l is. Als deze kleiner of gelijk is 0,25 mg N/l dan heeft de zuivering een laag risico. Voor een eerste inzicht in de omvang van de emissie kan voor de zuiveringen met een laag risico

¹ STOWA, 2010-08 Emissies van broeikasgassen vanuit RWZI's en STOWA, 2012-20 Emissie broeikasgassen vanuit RWZI's

een emissiefactor van 0,5% van de inkomende stikstofvracht worden gebruikt. Voor zuiveringen met een hoog risico bedraagt de emissiefactor 1,5%.

Richting de toekomst wordt geadviseerd:

- Om het eenvoudige risicomodel verder te verfijnen en waar van toepassing te verbeteren.
- Te onderzoeken of er nog andere procesparameters een goede voorspelling geven voor de mate van lachgasemissie en deze dan mogelijk op te nemen in een meer gedetailleerd model waardoor een meer gedifferentieerd (en nauwkeuriger) beeld ontstaat van de totale lachgasemissies vanuit zuiveringen in Nederland.
- Voor bovenstaande de al verzamelde data van de afgelopen één tot vijf jaar in te zetten

MONITOREN VAN DE LACHGASEMISSIE

De emissie van lachgas kan op verschillende wijzen worden bepaald. Het meten van de lachgasconcentratie in de afgezogen lucht van een afgedekte zuivering geeft de meest betrouwbare waarde voor de emissie van lachgas vanuit een zuivering. Wel geeft dit type meting minder inzicht in de oorzaken van de emissie en zijn het merendeel van de zuiveringen in Nederland niet afgedekt. Het bepalen van de emissie aan de hand van metingen van lachgas in de vloeistoffase wordt het meest toegepast. Voor elk type meting geldt dat deze tenminste gedurende een jaar wordt uitgevoerd om ook de seizoeninvloeden op de emissie mee te nemen. Bij het gebruik van de sensor die lachgas in de vloeistoffase meet dient aandacht besteed te worden aan:

- Het plaatsen van de sensoren op de juiste locatie.
- Er dient altijd uit te worden gegaan van twee sensoren, waarvan één altijd aan het eind van een anoxische zone wordt geplaatst. De tweede dient geplaatst te worden in het belangrijkste beluchtingszone (zone die altijd belucht wordt). De meest geschikte locatie dient in de praktijk eerst bepaald te worden door de sensor over een periode van vier weken op verschillende locaties te plaatsen in de beluchte zone.
- De werking van de sensor wordt door de leverancier voor vier maanden gegarandeerd, maar de levensduur van de sensor kan langer zijn. Belangrijk daarbij is dat deze regelmatig wordt schoongemaakt en gekalibreerd.
- De omrekening van de concentraties naar emissies. Dit kan op verschillende wijzen worden uitgevoerd, waarbij het aan te bevelen is om bij een langere meetperiode dit proces te automatiseren zodat de data ook goed uitgelezen en gebruikt kan worden.

Met het versnellingsprogramma op komst wordt geadviseerd:

- Te onderzoeken of andere meetmethoden dan de meting in de vloeistoffase beschikbaar zijn en een betrouwbaar resultaat voor de lachgasemissie opleveren.
- De al verzamelde en nog te verzamelen data centraal te verwerken en te visualiseren zodat een gezamenlijk analyse kan plaatsvinden en inzicht verkregen kan worden in hoe de emissie te voorspellen en hoe deze te reduceren.
- Een representatieve set zuiveringen te selecteren die inzicht kunnen geven in hoe de lachgasemissie (beter) is te voorspellen, en op welke wijze en in welke mate de emissie van lachgas gereduceerd kan worden.
- De concentraties nitriet in de beluchtingstank (en mogelijk ook het effluent) continu te monitoren zodat de rol van nitriet bij de vorming van lachgas beter begrepen kan worden;
- voor het meten van lachgas zijn diverse meetmethodes beschikbaar die nu al op een aantal zuiveringen worden onderzocht.
- De emissie van lachgas uit stikstofdeelstroombehandelingen ook mee te nemen.

REDUCEREN VAN DE EMISSIE

Uit het praktijkonderzoek in Nederland en de wetenschappelijke literatuur komen duidelijk drie oplossingsrichtingen naar voren die de emissie van lachgas kunnen reduceren:

- Het voorkomen van hoge ammoniumpieken (hoge N-slibbelasting);
- Het optimaliseren van de procesregelingen;
- Voldoende ruimte te geven aan de denitrificatie.

Bovenstaande oplossingsrichtingen komen erop neer dat gestreefd wordt naar een lage N_{tot} in het effluent voor een lage lachgasemissie.

Vanuit deze oplossingsrichtingen wordt geadviseerd de volgende onderzoeksvragen mee te nemen in een vervolgonderzoek:

- Hoe dienen de maatregelen er concreet uit te zien (procesinstellingen) om de emissie van lachgas te reduceren?
- Welke reductie van lachgas is mogelijk en van welke parameters is deze afhankelijk?
- Binnen welke grenzen van een bestaande zuivering is via processturing verlaging van de emissie mogelijk?
- Wat zijn de ontwerpparameters en de waarden daarvan voor een zuivering met minimale emissie?

DE STOWA IN HET KORT

STOWA is het kenniscentrum van de regionale waterbeheerders (veelal de waterschappen) in Nederland. STOWA ontwikkelt, vergaart, verspreidt en implementeert toegepaste kennis die de waterbeheerders nodig hebben om de opgaven waar zij in hun werk voor staan, goed uit te voeren. Deze kennis kan liggen op toegepast technisch, natuurwetenschappelijk, bestuurlijk-juridisch of sociaalwetenschappelijk gebied.

STOWA werkt in hoge mate vraaggestuurd. We inventariseren nauwgezet welke kennisvragen waterschappen hebben en zetten die vragen uit bij de juiste kennisleveranciers. Het initiatief daarvoor ligt veelal bij de kennisvragende waterbeheerders, maar soms ook bij kennisinstellingen en het bedrijfsleven. Dit tweerichtingsverkeer stimuleert vernieuwing en innovatie.

Vraaggestuurd werken betekent ook dat we zelf voortdurend op zoek zijn naar de 'kennisvragen van morgen' – de vragen die we graag op de agenda zetten nog voordat iemand ze gesteld heeft – om optimaal voorbereid te zijn op de toekomst.

STOWA ontzorgt de waterbeheerders. Wij nemen de aanbesteding en begeleiding van de gezamenlijke kennisprojecten op ons. Wij zorgen ervoor dat waterbeheerders verbonden blijven met deze projecten en er ook 'eigenaar' van zijn. Dit om te waarborgen dat de juiste kennisvragen worden beantwoord. De projecten worden begeleid door commissies waar regionale waterbeheerders zelf deel van uitmaken. De grote onderzoekslijnen worden per werkveld uitgezet en verantwoord door speciale programmacommissies. Ook hierin hebben de regionale waterbeheerders zitting.

STOWA verbindt niet alleen kennisvragers en kennisleveranciers, maar ook de regionale waterbeheerders onderling. Door de samenwerking van de waterbeheerders binnen STOWA zijn zij samen verantwoordelijk voor de programmering, zetten zij gezamenlijk de koers uit, worden meerdere waterschappen bij één en het zelfde onderzoek betrokken en komen de resultaten sneller ten goede aan alle waterschappen.

De grondbeginselen van STOWA zijn verwoord in onze missie:

Het samen met regionale waterbeheerders definiëren van hun kennisbehoeften op het gebied van het waterbeheer en het voor én met deze beheerders (laten) ontwikkelen, bijeenbrengen, beschikbaar maken, delen, verankeren en implementeren van de benodigde kennis.

ERVARINGEN VANUIT DE COMMUNITY OF PRACTICE OVER DE EMISSIE VAN LACHGAS VANUIT RIOOLWATERZUIVERINGSINSTALLATIES

INHOUD

	TEN GELEIDE	
	SAMENVATTING	
	DE STOWA IN HET KORT	
1	INLEIDING	1
	1.1 Achtergrond en doelstelling	1
	1.2 Leeswijzer	1
2	INSCHATTEN EMISSIES LACHGAS	3
	2.1 Inleiding	3
	2.2 Model 2019	3
	2.3 Update model 2019	4
	2.3.1 Aanpak	4
	2.3.2 Verificatie categorie laag risico uit model 2019	5
	2.3.3 Verificatie categorie gemiddeld risico uit model 2019	5
	2.3.4 Verificatie categorie hoog risico uit model 2019	6
	2.3.5 Aanpassing categorieën en emissiefactoren	6
	2.3.6 Update model 2019	8
	2.4 Onderzoek relatie nitriet en lachgasemissie	11
	2.4.1 Eerder onderzoek	11
	2.4.2 Relatie nitriet effluent en lachgasemissie	12
3	MONITOREN EMISSIE LACHGAS	15
	3.1 Het meten van de lachgasemissie	15
	3.2 Modelleren van lachgasvorming	15
	3.3 Lachgassensoren	16
	3.4 Plaatsen van de lachgassensoren	16
	3.5 Beheer en onderhoud van de lachgas sensoren	19
	3.6 Verwerken en omzetten van de data	19
	3.6.1 Gebruik controller Unisense	19
	3.6.2 Automatiseren in dataverwerkingssysteem van het waterschap	20
	3.6.3 Offlineverwerking in Excel	21

4	OPLOSSINGSRICHTINGEN REDUCTIE EMISSIE LACHGAS	23
4.1	Observaties uit 20 jaar onderzoek	23
4.1.1	De aanloop naar lachgas onderzoeken op rwzi's in Nederland	23
4.1.2	Academisch onderzoek	24
4.1.3	Praktijkonderzoek op rwzi's in Nederland	25
4.2	Lessons learned uit het CoP lachgas	28
4.2.1	Beheersen van het zuurstofgehalte	28
4.2.2	Slibeigenschappen	30
4.2.3	Retourstromen met hoge zuurstofconcentratie	30
4.2.4	CZV/N ratio	31
4.2.5	Temperatuur	32
4.2.6	RWA condities	32
4.2.7	Lage NH ₄ -N stuurwaarde	33
4.2.8	Overige aanknopingspunten	33
5	CONCLUSIES EN ADVIES	34
5.1	Conclusies	34
5.2	Advies	35
BIJLAGE A1	ENQUÊTE	37
BIJLAGE A2	BEREKENING N ₂ O EMISSIE RWZI MET BELLENBELUCHTING	47
BIJLAGE A3	BEREKENING N ₂ O EMISSIE RWZI MET PUNTBELUCHTING	50
BIJLAGE A4	FLOWSCHEMA BEREKENING N ₂ O EMISSIE RWZI MET BELLENBELUCHTING	53
BIJLAGE A5	FLOWSCHEMA BEREKENING N ₂ O EMISSIE RWZI MET PUNTBELUCHTING	54
BIJLAGE A6	FLOWSCHEMA BEREKENING N ₂ O EMISSIE IN DE ANOXISCHE ZONE	55
BIJLAGE A7	LACHGASBEREKENINGEN HISTORIAN	56
BIJLAGE A8	VASTE GEGEVENS AUTOMATISEREN BEREKENINGEN	58

1

INLEIDING

1.1 ACHTERGROND EN DOELSTELLING

Van de totale CO₂ voetafdruk van een rwzi is een significant deel te wijten aan de emissie van lachgas². De emissie van lachgas varieert echter sterk (zowel in tijd als tussen verschillende rwzi's). Dit betekent dat er altijd metingen nodig zijn om de emissie op een rwzi vast te stellen. Enkele waterschappen zijn hier voortvarend mee aan de slag gegaan, wat eind 2019 reden was voor STOWA om een Community of Practice (CoP) lachgas op te richten. Hier worden kennis en ervaringen gedeeld, maar waterschappen worden ook ondersteund om lachgasmetingen op te zetten.

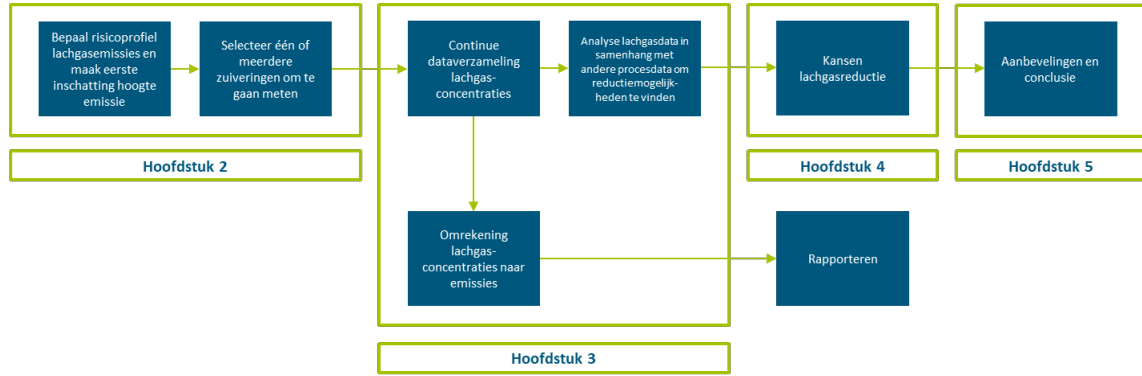
Ruim twee jaar later zijn bijna alle waterschappen aangesloten en wordt op veel zuiveringen onderzoek gedaan naar de omvang van de lachgasemissies en manieren om deze te reduceren. Het CoP heeft hierin een belangrijke bijdrage geleverd en gezorgd voor een versnelling van het onderzoek naar de emissie van lachgas uit zuiveringsinstallaties. Vanuit deze positieve ervaring wil STOWA de activiteiten rondom het CoP lachgas voortzetten en de ervaringen en resultaten van twee jaar CoP samenvatten in een rapportage. Bovendien is dit rapport te lezen als een stappenplan dat gebruikt kan worden bij het opzetten van een lachgasmeetcampagne.

1.2 LEESWIJZER

Hoofdstuk twee vat het risicomodel voor het inschatten van lachgasemissies uit rwzi's samen³. Dit is in 2019 opgesteld aan de hand van toen beschikbare data. Nu er veel meer data beschikbaar zijn is een update gemaakt van het risicomodel. Hoofdstuk drie beschrijft de installatie van de sensoren en aandachtspunten met betrekking tot beheer en onderhoud van de metingen. Daarnaast gaat hoofdstuk drie in op 'best practices' met betrekking tot het omrekenen van gemeten lachgasconcentraties naar emissiedata, en de wijze waarop de data kunnen worden uitgelezen. Om werkelijk stappen te zetten en de verzamelde data nuttig in te zetten, zullen er mitigatiemaatregelen geïdentificeerd dienen te worden waarmee lachgasemissie wordt teruggedrongen. In hoofdstuk vier wordt samengevat welke lessen er al zijn getrokken uit academisch onderzoek én praktijkonderzoek in Nederland. Ook wordt aandacht besteed aan de observaties die in de Nederlandse praktijk al zijn gedaan en wordt richting gegeven aan mogelijke interventies. In hoofdstuk vijf worden de aanbevelingen met betrekking tot lachgasmonitoring en -reductie op rwzi's samengevat. Figuur 1.1 geeft een schematisch overzicht van deze leeswijzer.

- 2 STOWA, 2012-20 Emissie broeikasgassen vanuit RWZI's en STOWA, 2010-08 Emissies van broeikasgassen vanuit RWZI's
- 3 STOWA-rapport 2019-05 biedt een uitgebreider overzicht rondom de totstandkoming van het risicomodel, en biedt de waterschappen handvatten om het risico op lachgas in te schatten zodat gericht lachgas gemeten kan worden.

FIGUUR 1.1 SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN HET STAPPENPLAN VOOR HET BEPALEN VAN LACHGASEMISSIES EN LEESWIJZER VOOR DIT RAPPORT



2

INSCHATTEN EMISSIES LACHGAS

2.1 INLEIDING

Voor het rapporteren van de lachgasemissie vanuit de Nederlandse zuiveringen wordt op dit moment de IPCC factor van 1,6% gehanteerd. De ervaringen uit het Nederlandse onderzoek heeft al langere tijd geleden vastgesteld dat één emissiefactor niet de variatie in de waargenomen emissie tussen zuiveringen meeneemt. Tegelijkertijd is het de vraag of de emissiefactor van 1,6% representatief is voor de Nederlandse zuiveringen. Om die reden is in 2019 een simpel risicomodel ontwikkeld. Met een simpel risicomodel is de hoogte van het risico op de emissie van lachgas in te schatten². Dit model is in 2019 opgesteld aan de hand van de toen beschikbare data. De hoeveelheid data was destijds beperkt waardoor de inschatting van de emissie vrij 'ruw' was. Sinds 2019 zijn veel meer waterschappen gaan meten en is er meer data beschikbaar om het risicomodel uit 2019 aan te passen. Daarnaast is ook uit de literatuur⁴ duidelijk geworden dat er mogelijk een relatie is tussen de concentratie nitriet in het effluent en de omvang van de lachgasemissie vanuit de zuivering. In de update van het model wordt het risico op lachgasemissie ingeschat op basis van de jaargemiddelde concentraties ammonium en nitriet in het effluent. De update van het risicomodel en de resultaten van het onderzoek naar de relatie tussen nitriet en de emissiefactor worden in het vervolg van dit hoofdstuk besproken. Dit hoofdstuk geeft daarmee de huidige stand van zaken (anno 2023) weer, maar met een toename van de meetinspanningen in de komende periode komen nog meer data beschikbaar waardoor het model richting de toekomst verder kan worden verbeterd.

2.2 MODEL 2019

In het risicomodel is voor de parameters ammonium en nitriet gekozen, omdat zij een belangrijke rol spelen bij de vorming van lachgas. Uit het eerdere STOWA-onderzoek is gebleken dat de ammonium- en nitrietconcentratie samen met de zuurstofconcentratie de belangrijkste parameters zijn bij de vorming van lachgas⁵. Omdat zuurstofconcentraties in beluchtingstanks sterk kunnen verschillen tussen zuiveringen is gekozen voor de concentraties ammonium en nitriet in het effluent, omdat dit ook data zijn die eenvoudig beschikbaar zijn. Wel is het zo een hoge ammoniumconcentratie in het effluent ook het gevolg kan zijn van het niet om kunnen zetten van ammonium (door verschillende oorzaken). Vandaar dat de concentratie nitriet meer gewicht krijgt bij de risico-inschatting dan de ammoniumconcentratie.

Op basis van gemiddelde effluentwaarden voor ammonium en nitriet kan dus een inschatting worden gemaakt van het risico op lachgasvorming- en emissie. Dit risico vertaalt zich naar een emissiefactor voor lachgas vanuit de waterlijn. Het doel van de risico-inschatting is niet

4 Gruber W. et al., 1 December 2021, Estimation of countrywide N₂O emissions from wastewater treatment in Switzerland using long-term monitoring data, Water Research 13 100122

5 Deze waarneming wordt ondersteund door: Ni, B-J., Peng, L., Law, Y., Guo, J., Yuan, Z., 2014, Modelling of Nitrous Oxide Production by Autotrophic Ammonium Oxidizing Bacteria with Multiple Production Pathways, Environmental Science & Technology, 48, p. 3916 – 3924 en Peng, L., Ni, B-J., Erler, D., Ye, L., Yuan, Z., 2014, The effect of dissolved oxygen on N₂O production by ammonium-oxidizing bacteria in an enriched nitrifying sludge, Water Research, 66, p. 12 – 21

om de lachgasemissie te kwantificeren (hiervoor zijn metingen nodig), maar om de rwzi's met het grootste potentieel voor lachgasvorming te identificeren zodat men gericht te werk kan gaan met het meten van lachgas en het toepassen van maatregelen om emissie te reduceren.

De risico-inschatting gebeurt op basis van twee stappen:

1. Verzamelen van jaargemiddelde effluentdata voor ammonium en nitriet;
2. Score toekennen aan effluentwaarden volgens Tabel 2.1 een totaalscore per zuivering bepalen.

TABEL 2.1¹ RISICO-INVENTARISATIE OP BASIS VAN EFFLUENTGEHALTE² VAN AMMONIUM EN NITRIET

Parameter	Eenheid	Risico - hoog	Risico - gemiddeld	Risico - laag
		Waarde	Score	Waarde
Ammonium	mgN/L	> 2	3	1 - 2
Nitriet	mgN/L	> 0,5	6	0,2 - 0,5

¹ Naar STOWA 2019 – 05. ² Effluentgehalten op basis van gewogen jaargemiddelde

Een totale score zoals af te leiden uit Tabel 2.1 leidt tot een emissiefactor: een percentage van de inkomende stikstofvracht (als Kj-N) per dag die op basis van het risicomodel wordt omgezet in een emissiefactor voor lachgas, zie Tabel 2.2.

TABEL 2.2 EMISSIEFACTOREN GERELATEERD AAN TOTALE RISICOSCORE OP BASIS VAN NH₄⁺- EN NO₂⁻-CONCENTRATIE IN HET EFFLUENT

Categorie	Totale score	Emissiefactor (%)	Range(%)
Laag	≤ 4	0,05 (middel)	ondergrens: 0,01 bovengrens: 0,1
Gemiddeld	5	0,5 (middel)	ondergrens: 0,1 bovengrens: 1
Hoog	≥ 6	3 (middel)	ondergrens: 1 bovengrens: 5

2.3 UPDATE MODEL 2019

2.3.1 AANPAK

Voor de verificatie van het model zijn de data van drie zuiveringen gebruikt:

- Amsterdam West ((m)UCT): voor de periode van september 2016 tot juni 2022
- Haaren (PhoRedox): voor de periode van 1 januari 2021 – 31 december 2021
- Schiphol (anox – aeroob): voor de periode van 10 februari 2022 – 19 april 2022

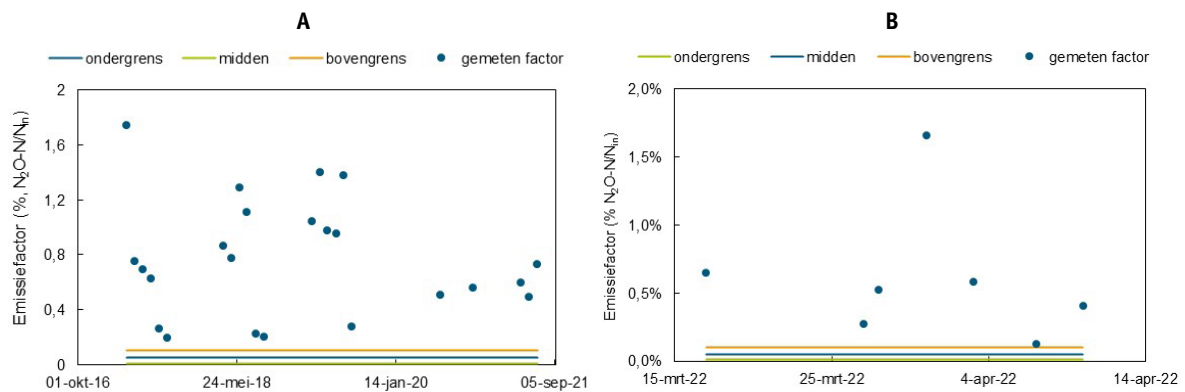
Voor de zuiveringen van Amsterdam West en Haaren waren maandgemiddelde concentraties ammonium en nitriet in het effluent beschikbaar en de gemeten emissiefactor voor lachgas. Voor Amsterdam West betekende dit dat 70 datapunten beschikbaar waren en voor Haaren twaalf. Voor Amsterdam West dient wel aangetekend te worden dat de nitrietconcentratie het gemiddelde is van alle zeven straten op de zuivering en dus niet de waarde geeft voor de straat waarin lachgas is gemeten. In de aangegeven periode voor Schiphol waren 19 datapunten beschikbaar voor een volledige verificatie. Een volledige verificatie is mogelijk als er zowel een ammonium als nitrietwaardes in het effluent beschikbaar waren om zo aan de hand van het risicomodel een risico-inschatting te maken en zo de emissiefactor te bepalen. Deze 'berekende' emissiefactor is vervolgens vergeleken met de gemeten emissiefactor. Op deze manier is eerst gekeken of de aangegeven range in emissiefactoren per categorie correct is. Als deze niet correct is, is in tweede instantie gekeken naar welke range

dan wel van toepassing is. Vervolgens is met deze kennis een update gemaakt van het model uit 2019. De emissiefactor wordt daarbij uitgedrukt in N_2O-N per $kg\ NKj_{inflow}$, ongeacht of er sprake is van de aanwezigheid van een rejectiewaterstroom met een hoge stikstofvracht. In de toekomst zou er naar gekeken kunnen worden om de emissie voor zuiveringen met dergelijke rejectiewaterstromen uit te drukken in N_2O-N per $kg\ NKj_{aanvoer\ AT}$.

2.3.2 VERIFICATIE CATEGORIE LAAG RISICO UIT MODEL 2019

Voor de toetsing van de categorie laag risico waren voldoende data beschikbaar van de zuiveringen Amsterdam West en Schiphol. De gemeten emissiefactoren op deze twee zuiveringen is samen met de onder-middel-en bovengrens van de categorie laag weergegeven in Figuur 2.1.

FIGUUR 2.1 GEMETEN EMISSIEFACTOR EN ONDER-MIDDEL-BOVEN GRENS VAN DE RISICOCATEGORIE LAAG VOOR A: AMSTERDAM WEST (MAANDWAARDEN) EN B: SCHIPHOL (DAGWAARDEN). ONDERGRENS IS 0,01%, MIDDEN IS 0,05% EN BOVENGRENS IS 0,1% (ZIE OOK TABEL 2.2)

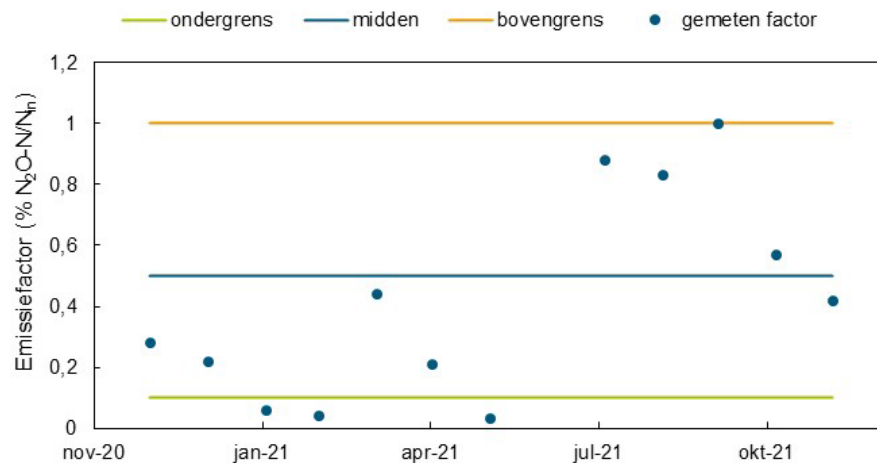


Het is duidelijk te zien dat de gemeten emissiefactoren ruim boven de tot nu gehanteerde range ligt van 0,01 – 0,1% voor de twee onderzochte zuiveringen. De emissiefactoren variëren van 0,2% tot ruim 1,5%. Voor deze categorie is dus een herziening van de grenzen nodig. Na de bespreking van de categorie gemiddeld en hoog wordt hier verder op ingegaan.

2.3.3 VERIFICATIE CATEGORIE GEMIDDELD RISICO UIT MODEL 2019

Voor toetsing van de categorie gemiddeld is gebruik gemaakt van de data van Haaren. De gemeten emissiefactoren op deze zuivering is samen met de onder-middel-en bovengrens van de categorie gemiddeld weergegeven in Figuur 2.2.

FIGUUR 2.2 GEMETEN EMISSIEFACTOR (MAANDWAARDEN) EN ONDER-MIDDEL-BOVEN GRENS VAN DE RISICOCATEGORIE GEMIDDELD VOOR HAAREN. ONDERGRENS IS 0,1%, MIDDEN IS 0,5% EN BOVENGRENS IS 1,0% (ZIE OOK TABEL 2.2)

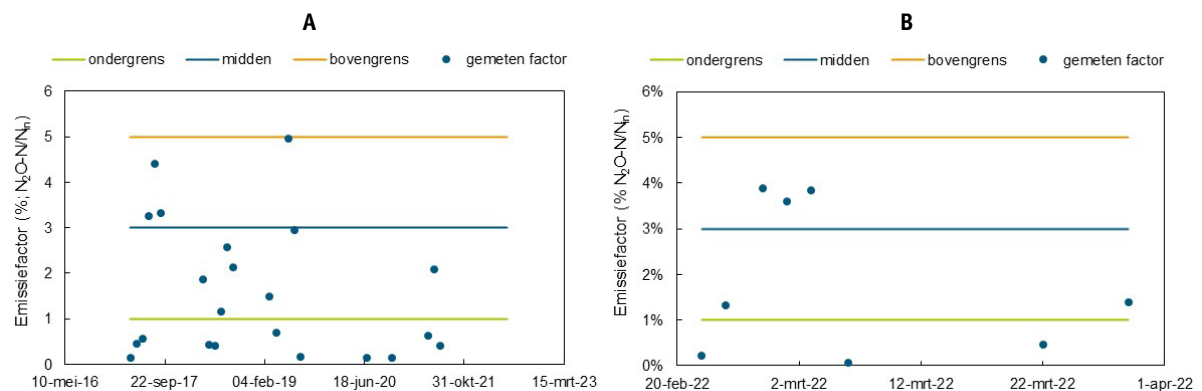


De gemeten emissiefactoren in Haaren liggen grotendeels binnen de gehanteerde range van 0,1% tot 1%. Tegelijkertijd is de zien dat de gemeten emissiefactoren in dezelfde range liggen als bij de categorie laag is waargenomen (zie Figuur 2.2). Aangezien de meetdata laten zien dat er weinig onderscheid is tussen de categorie laag en gemiddeld is het voorstel om deze categorie samen te voegen tot één categorie, waarvan de range later wordt vastgesteld.

2.3.4 VERIFICATIE CATEGORIE HOOG RISICO UIT MODEL 2019

Voor toetsing van de categorie hoog is gebruik gemaakt van de data van Amsterdam West en Schiphol. De gemeten emissiefactoren op deze twee zuiveringen is samen met de onder-middel- en bovengrens van de categorie hoog weergegeven in Figuur 2.3. Voor Amsterdam West is duidelijk te zien dat het merendeel van de gemeten emissiefactoren onder de gemiddelde waarde ligt voor de categorie 'hoog' (3%). Bij Schiphol liggen relatief meer meetdata boven het gemiddelde. Hierbij dient wel aangetekend worden dat de meetperiode voor Schiphol aan het eind van de winter was waar veelal hogere emissiefactoren worden gemeten. Om die reden is het voorstel om ook voor de categorie hoog de range aan te passen zodat deze beter aansluit bij de nu gemeten emissiefactoren.

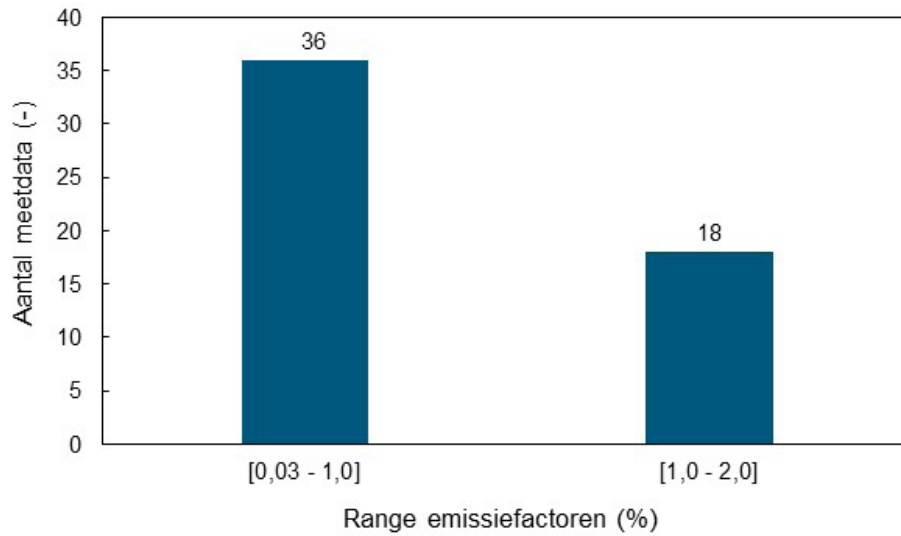
FIGUUR 2.3 GEMETEN EMISSIEFACTOR EN ONDER-MIDDEL-BOVEN GRENS VAN DE RISICOCATEGORIE HOOG VOOR A: AMSTERDAM WEST (MAANDWAARDEN) EN B: SCHIPHOL (DAGWAARDEN). ONDERGREN IS 1%, MIDDEN IS 3% EN BOVENGREN IS 5% (ZIE OOK TABEL 2.2)



2.3.5 AANPASSING CATEGORIEËN EN EMISSIEFACTOREN

Aan de hand van de verificatie van het huidige risicomodel is het voorstel het aantal categorieën terug te brengen van drie naar twee en deze in te delen in 'laag risico' en 'hoog risico'. Om voor elk van deze categorieën een nieuwe range vast te stellen is een frequentieverdeling (histogram) gemaakt van de gemeten emissiefactoren per nieuwe categorie. Voor de nieuwe **categorie laag** zijn daarvoor de data van Amsterdam-West, Haaren en Schiphol gebruikt. Het resultaat is weergegeven in Figuur 2.4.

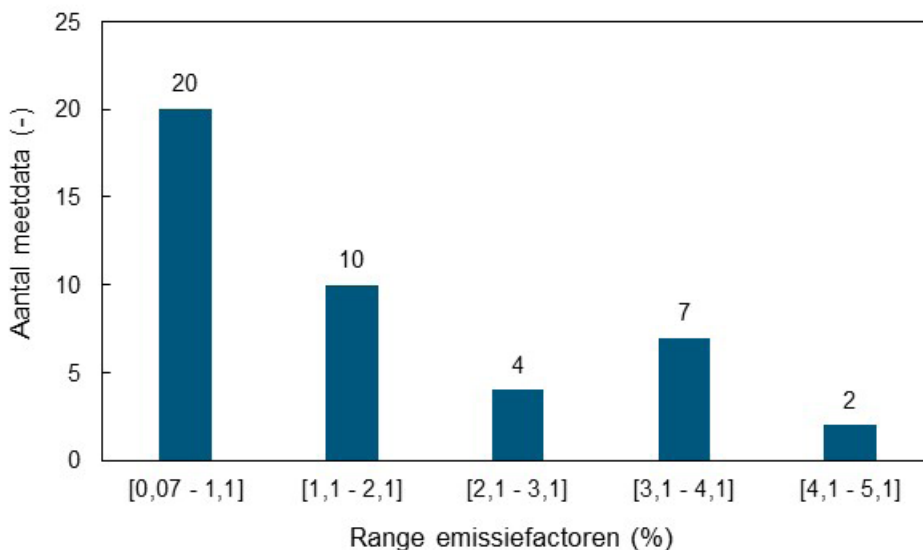
FIGUUR 2.4 FREQUENTIEVERDELING (HISTOGRAM) GEMETEN EMISSIEFACTOREN (MAANDDATA VOOR AMSTERDAM-WEST EN HAAREN, DAGDATA VOOR SCHIPHOL) VOOR NIEUWE CATEGORIE LAAG. PER KOLOM IS AANGEGEVEN HOEVEEL MEETDATA ZICH BEVINDEN IN DE AANGEGEVEN RANGE OP DE X-AS



Uit Figuur 24 is af te leiden dat het merendeel van de gemeten emissiefactoren zich bevinden in de range van 0,03 tot 1%. Met een totaal van 36 meetdata ligt bijna 70% van deze meetdata in de range van 0,03 tot 1%. Het voorstel is om de range voor de nieuwe categorie 'laag' een range van 0,1% - 1% aan te houden met een gemiddelde van 0,5%. Dit sluit ook aan bij het gemiddelde van de meetdata die 0,6% bedraagt.

Voor de aanpassing van de nieuwe **categorie hoog** zijn de data van Amsterdam West en Schiphol gebruikt. Het resultaat is weergegeven in Figuur 2.5.

FIGUUR 2.5 FREQUENTIEVERDELING (HISTOGRAM) GEMETEN EMISSIEFACTOREN (MAANDDATA VOOR AMSTERDAM-WEST, DAGDATA VOOR SCHIPHOL) IN DIVERSE RANGES. PER KOLOM IS AANGEGEVEN HOEVEEL MEETDATA ZICH BEVINDEN IN DE AANGEGEVEN RANGE OP DE X-AS



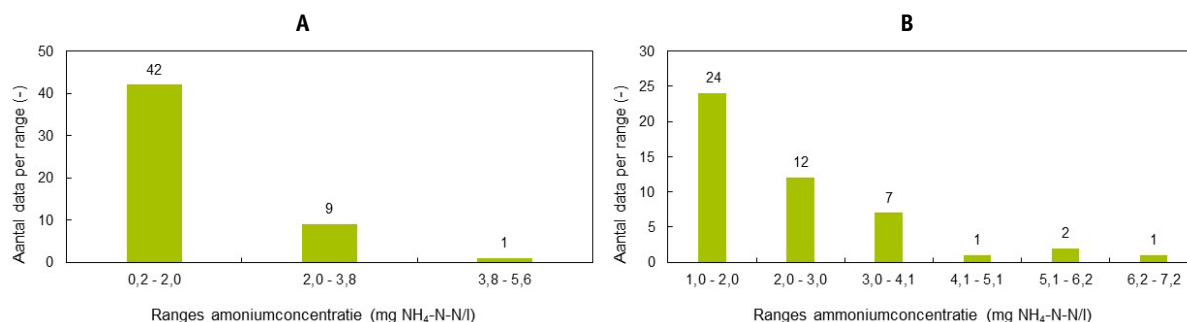
Het merendeel van de data bevindt zich in de range tussen 0,1 en 2%, dit betreft 70% van de data. Een kwart van de meetdata ligt nog tussen de 2 en 3% veelal gemeten in de wintermaanden van het jaar in Amsterdam West en Schiphol. Om die reden is het voorstel om de range voor de nieuwe categorie hoog vast te stellen op 1 tot 2% met een gemiddelde van 1,5%. Dit gemiddelde komt ook overeen met het gemeten gemiddelde van 1,6%.

2.3.6 UPDATE MODEL 2019

Grenswaarden ammonium en nitriet effluent

In het aangepaste model worden dus twee categorieën onderscheiden, zuiveringen met een laag risico en zuiveringen met een hoog risico op lachgasemissie. Om zuiveringen in deze nieuwe categorieën in te delen is het risicomodel en de score toekenning aangepast. Eerst is gekeken bij welke concentraties ammonium en nitriet in het effluent een score 'laag' of 'hoog' wordt toegekend. Dit is gedaan door op basis van de oude methode (zie Tabel 2.1 en Tabel 2.2) de meetdata in te delen in laag (inclusief gemiddeld) en hoog risico op lachgasemissie. Vervolgens zijn per categorie de gemeten concentraties ammonium en nitriet in een histogram (frequentieverdeling) gezet. Het resultaat voor de ammoniumconcentraties is weergegeven in Figuur 2.6.

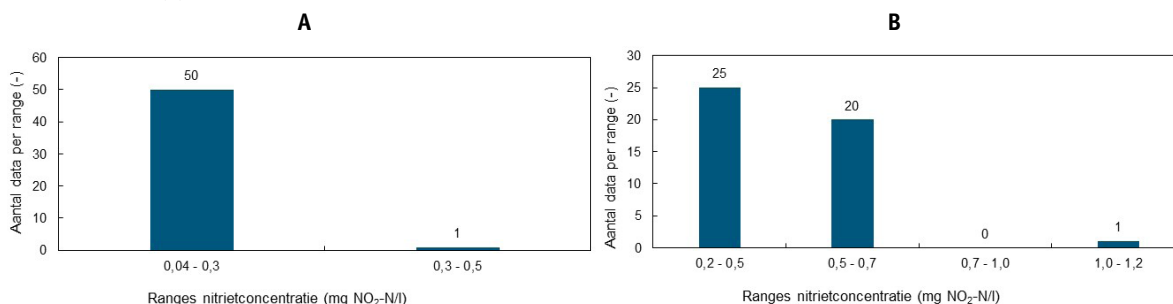
FIGUUR 2.6 FREQUENTIEVERDELING (HISTOGRAM) VOOR DE GEMETEN AMMONIUMCONCENTRATIES VOOR DATA MET EEN LAAG RISICO (A) EN HOOG (B) RISICO OP LACHGASEMISSIE



Aan de hand van Figuur 2.6 is af te leiden dat de ammoniumconcentratie voor de datapunten met een laag risico in meerderheid (~80%) onder de 2 mg/l ligt. Voor de datapunten met een hoog risico ligt zeker ook een deel (~50%) boven de 2 mg/l. Het voorstel is daarom om voor ammoniumconcentraties kleiner dan 2 mg/l een lage risicoscore toe te kennen (score = 1) en voor ammoniumconcentraties hoger dan 2 mg/l een hoge risicoscore toe te kennen (score = 2).

De frequentieverdeling voor de nitrietconcentraties is weergegeven in Figuur 2.7.

FIGUUR 2.7 FREQUENTIEVERDELING (HISTOGRAM) VOOR DE GEMETEN NITRIETCONCENTRATIES VOOR DATA MET EEN LAAG RISICO (A) EN HOOG (B) RISICO OP LACHGASEMISSIE



Uit Figuur 2.7 wordt duidelijk dat bij de datapunten met een laag risico de nitrietconcentratie niet boven de 0,29 mg/l komt, terwijl bij de datapunten met een hoog risico de nitrietconcentratie niet onder de 0,21 mg/l komt. Het voorstel is daarom om voor nitrietconcentraties kleiner dan 0,25 mg/l een lage risicoscore toe te kennen (score = 2) en voor nitrietconcentraties hoger dan 0,25 mg/l een hoge risicoscore toe te kennen (score = 4). De score voor nitriet wordt hierbij net als in het oude model zwaarder meegeteld.

Indeling zuiveringen in laag – en hoog risico

De tweede stap in de update van het model is om aan de hand van de totaalscore (ammonium + nitriet) het onderscheid te maken in zuiveringen met een laag of hoog risico op lachgasemissie. Een overzicht van de toe te kennen scores voor de effluentconcentraties ammonium en nitriet is opgenomen in Tabel 2.3.

TABEL 23 OVERZICHT VAN DE TOE TE KENNEN SCORES VOOR DE CONCENTRATIES AMMONIUM EN NITRIET IN HET EFFLUENT

	Concentratie NH ₄ -N (mg/l)	Score NH ₄ -N	Concentratie NO ₂ -N (mg/l)	Score NO ₂ -N
Laag	≤ 2	1	≤ 0,25	2
Hoog	> 2	2	> 0,25	4

Het onderscheid tussen een laag en hoog risico wordt net als in het oude model gebaseerd op de risicoscore voor nitriet. Dit betekent dat als de nitrietscore hoog is de zuivering altijd in de risicocategorie hoog valt. Dit betekent dat bij een totaalscore van 5 of 6 een zuivering een hoog risico heeft op lachgasemissie en bij een score van 3 of 4 in de risicocategorie laag valt. In Tabel 2.4 is dit nog eens samengevat samen met de eerder vastgestelde range en gemiddelde emissiefactor.

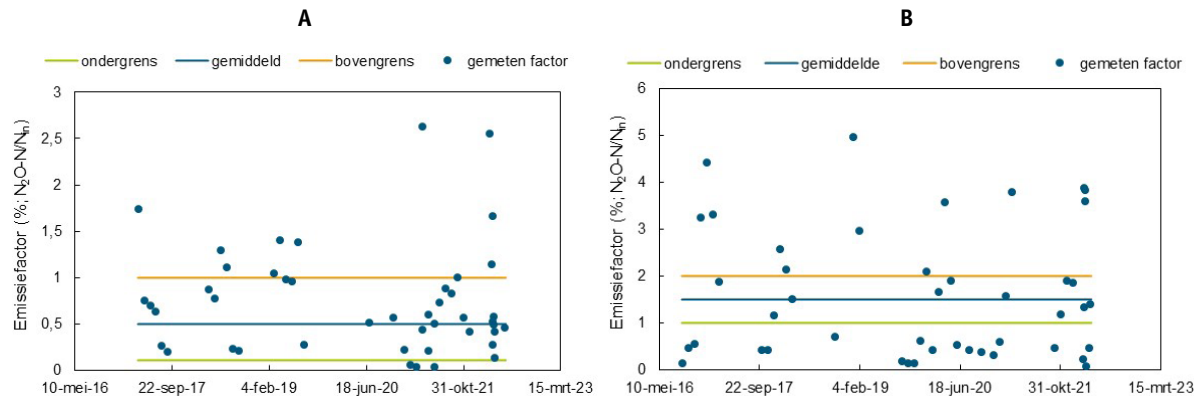
TABEL 24 EMISSIEFACTOREN GERELATEERD AAN TOTALE RISICOSCORE OP BASIS VAN NH₄⁺- EN NO₂⁻-CONCENTRATIE IN HET EFFLUENT

Categorie	Totaalscore	Emissiefactor (%)	Range (%)
Laag	≤ 4	0,5 (middel)	ondergrens: 0,1 bovengrens: 1
Hoog	≥ 4	1,5 (middel)	ondergrens: 1 bovengrens: 2

Verificatie aangepaste model

Tot slot zijn aan de hand van de eerder geselecteerde data met een laag en hoog risico, ingeschat met oude methode (2019), gebruikt om het nieuwe model te verifiëren. Het resultaat voor de data met een laag en hoog risico is weergegeven in Figuur 2.8.

FIGUUR 2.8 GEMETEN EMISSIEFACTOR (MAANDWAARDEN) EN ONDER-MIDDEL- EN BOVENRENS VOOR DE RISICOCATEGORIE LAAG (A) EN HOOG (B). VOOR DE RISICOCATEGORIE LAAG IS DE ONDERGRENNS VOOR DE EMISSIEFACTOR 0,1%, IS DEZE 0,5% ALS GEMIDDELDE EN 1% IS DE BOVENRENS. VOOR DE RISICOCATEGORIE HOOG IS DE ONDERGRENNS VOOR DE EMISSIEFACTOR 1%, IS DEZE 1,5% ALS GEMIDDELDE EN 2% IS DE BOVENRENS (ZIE OOK TABEL 2.4)



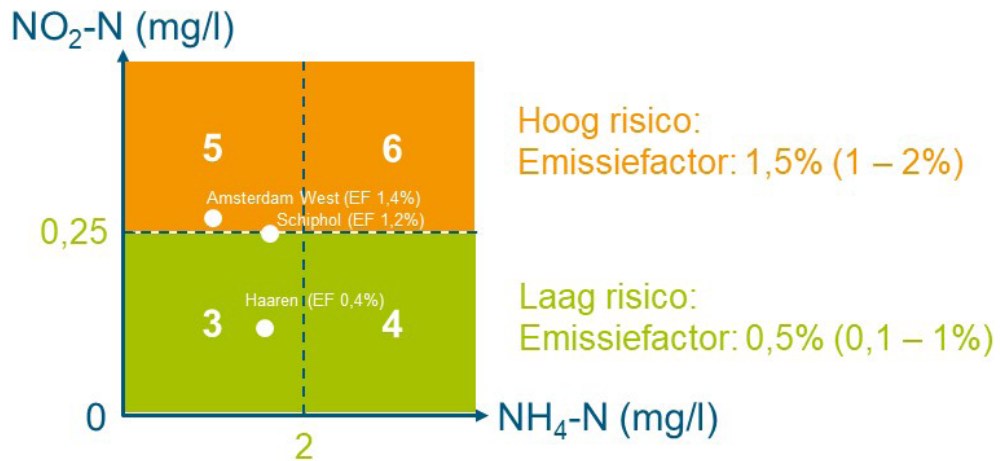
Op basis van alle gemeten emissiefactoren is per categorie een gemiddelde berekend. Voor de risicocategorie laag ligt het gemiddelde van de meetdata op 0,7% wat redelijk overeenkomt met het gemiddelde van die categorie (zie Tabel 2.4). Dit geldt ook voor de risicocategorie waar de gemiddelde waarde op 1,6% ligt, dichtbij de 1,5% als gemiddelde voor deze categorie. In Figuur 2.8 is echter af te leiden dat er nog wel een redelijke variatie aanwezig is in de gemeten emissiefactoren. Met meer data kan deze variatie worden verlaagd en kan tot een betrouwbaardere inschatting gekomen worden voor de emissie van lachgas. De variatie die zichtbaar is wordt veelal veroorzaakt door de gemeten emissiefactoren die in de winter-lente zijn bepaald en over het algemeen wat hoger liggen. Voor elk risicomodel zal het moeilijk zijn deze uitschieters te vangen in een risico-inschatting op basis van dag of maanddata. Om tot een goede risico-inschatting te komen om zuiveringen in te delen in laag – of hoog risico is het advies om hier jaargemiddelde data voor te gebruiken. Dit wordt ook ondersteund als gekeken wordt naar de eerder vermelde gemiddeldes van de gemeten emissiefactoren in elk van de twee risicocategorieën.

Samenvatting aangepaste model

Om een duidelijk beeld te krijgen van het aangepaste simpele risicomodel zijn de gegevens uit Tabel 2.3 en Tabel 2.4 schematisch weergegeven in Figuur 2.9. Aan deze figuur zijn de meetgegevens van drie zuiveringen weergegeven waarvan ook de gemeten emissiefactor bekend is.

FIGUUR 2.9

SCHEMATISCHE WEERGAVE AANGEPAST SIMPEL RISICOMODEL VOOR HET INSCHATTEN VAN DE LACHGAS EMISSIE VANUIT ZUIVERINGEN. DE NUMMERS IN DE BLOKKEN GEVEN DE MOGELIJKE TOTAAL RISICOSCORE WEER (SOM AMMONIUM RISICO SCORE EN NITRIET RISICO SCORE)



De gemeten gemiddelde nitrietconcentratie in het effluent voor Amsterdam West bedroeg 0,3 mg/l en ammonium was 0,9 mg/l (over de periode september 2016 – juni 2022). De concentratie voor nitriet maakt dat de zuivering van Amsterdam West in de categorie hoog valt. De gemeten gemiddelde emissie in de aangeven periode van 1,4% sluit aan bij de vastgestelde emissiefactor van 1,5% voor de categorie hoog. De meetperiode van Schiphol was korter (februari 2022 – april 2022) dan in Amsterdam West. In deze periode bedroeg de gemiddelde nitrietconcentratie 0,25 mg/l en bedroeg de gemiddelde concentratie ammonium 1,7 mg/l. Hiermee valt de zuivering Schiphol net in de categorie laag, omdat bij een nitrietconcentratie gelijk of kleiner dan 0,25 mg/l het risico op laag wordt vastgesteld. De gemeten emissiefactor op Schiphol bedroeg 1,2% welke beter past bij de hoog risico categorie. De beschikbare meetdata zijn vooral in de winterperiode verzameld, waar de emissie vaak wat hoger ligt. Dit laat zien dat data over een jaar beschikbaar dienen te zijn om tot een goede risico-inschatting te komen. De gemeten emissiefactor van Haaren van 0,4% ligt weer keurig dicht bij de vastgestelde emissiefactor van 0,5% voor de risicocategorie laag.

2.4 ONDERZOEK RELATIE NITRIET EN LACHGASEMISSIE

2.4.1 EERDER ONDERZOEK

Uit diverse wetenschappelijke onderzoeken blijkt dat nitriet een belangrijke rol speelt bij de vorming van lachgas tijdens de nitrificatie en denitrificatie. Een rechtstreekse relatie tussen nitriet en lachgasemissie kan een hulpmiddel zijn om de omvang van de emissie in te schatten, maar ook om de voortgang in reductie van de emissie te monitoren. Voorwaarden zijn dat nitriet continu gemeten kan worden⁶ en dat er daadwerkelijk een relatie is tussen nitriet en de hoogte van de lachemissie.

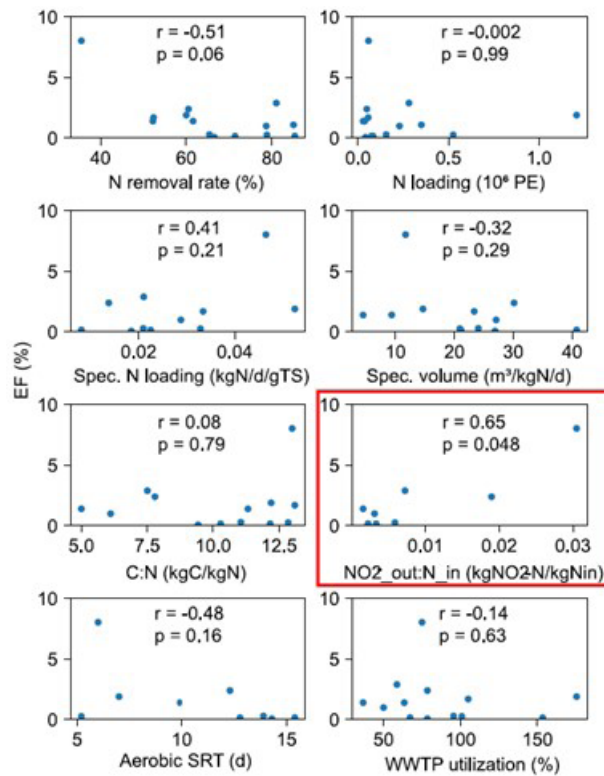
In het rapport van 2019¹ is geconcludeerd dat nitriet in het effluent een goede indicator is voor de mate van risico op de vorming van lachgas. Alleen kan op basis van de nitrietconcentratie in het effluent geen directe relatie worden gelegd met de hoogte van de lachgasvorming- en emissie.

Er was wel een zeer goede relatie zichtbaar tussen nitrietmetingen in de aeratietank en de hoogte van de lachgasemissie ($r^2 > 0,95$), maar de relatie was dus niet zichtbaar tussen de nitrietconcentratie in het effluent en de gemeten emissiefactor. Echter in een recent (2021) gepubliceerd onderzoek uit Zwitserland werd wel een redelijke correlatie gevonden tussen

⁶ Diverse leveranciers zijn bezig met de ontwikkeling van een lachgassensor- of analyser.

de concentraties nitriet in het effluent en de gemeten emissiefactor². In dit onderzoek is op veertien zuiveringen de emissie van lachgas gedurende een jaar gemonitord en is achteraf voor 8 parameters onderzocht of er een correlatie was met de hoogte van de lachgasemissie. Alleen tussen de nitrietconcentratie in het effluent en de lachgasemissie werd een goede correlatie gevonden, zoals is te zien in

FIGUUR 2.10 RELATIE TUSSEN GEMETEN EMISSIEFACTOR (EF) VOOR LACHGAS (IN VEERTIEN ZUIVERINGEN IN ZWITSERLAND) EN DIVERSE PARAMETERS, MET IN DE RODE BOX DE RELATIE MET DE NITRIETCONCENTRATIE IN HET EFFLUENT²



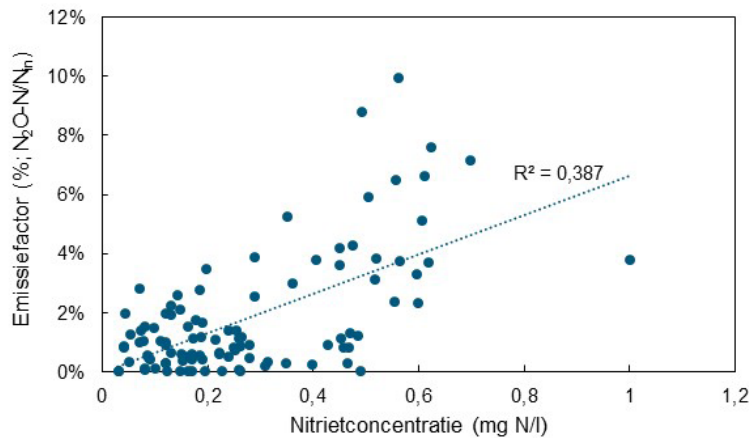
Nu er ook in Nederland meer data beschikbaar zijn is nogmaals gekeken naar een mogelijke relatie tussen nitriet in het effluent en de hoogte van de lachgasemissie.

2.4.2 RELATIE NITRIET EFFLUENT EN LACHGASEMISSIE

Voor het onderzoek naar een mogelijke relatie tussen de nitrietconcentratie in het effluent en de lachgasemissie zijn de data van Amsterdam West (maanddata), Schiphol (dagdata) en Haaren (maanddata) gebruikt. De relatie tussen de nitrietconcentratie in het effluent en de lachgasemissie is onderzocht door alle beschikbare data van Amsterdam West⁷, Haaren en Schiphol te gebruiken. Het resultaat daarvan is weergegeven in Figuur 2.11.

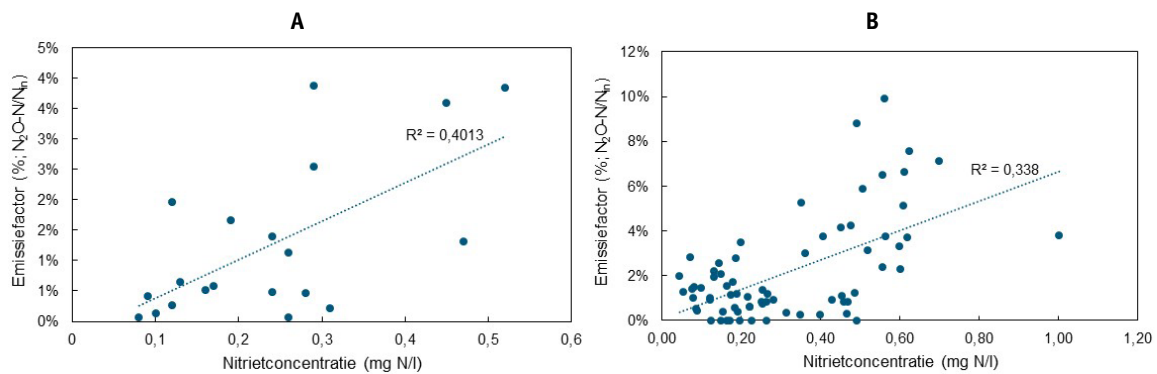
⁷ De nitrietdata van Amsterdam West zijn het gemiddelde van alle zeven straten op de zuivering, terwijl de lachgasemissie is gemeten in één straat.

FIGUUR 2.11 RELATIE NITRIETCONCENTRATIE EFFLUENT EN DE EMISSIEFACTOR VOOR LACHGAS (DATA VAN: AMSTERDAM WEST (MAANDDATA), HAAREN (MAANDDATA) EN SCHIPHOL (DAGDATA))



Uit Figuur 2.10 blijkt dat er enige relatie zichtbaar is, maar dat de correlatie niet heel sterk is. Eenzelfde beeld is zichtbaar als gekeken worden naar de relatie op zuiveringsniveau. Voor de zuiveringen van Amsterdam West en Schiphol is dit zichtbaar gemaakt in Figuur 2.11.

FIGUUR 2.12 RELATIE TUSSEN DE NITRIETCONCENTRATIE IN HET EFFLUENT EN DE GEMETEN EMISSIEFACTOR VOOR A: SCHIPHOL (DAGDATA) EN B: AMSTERDAM WEST (MAANDDATA)

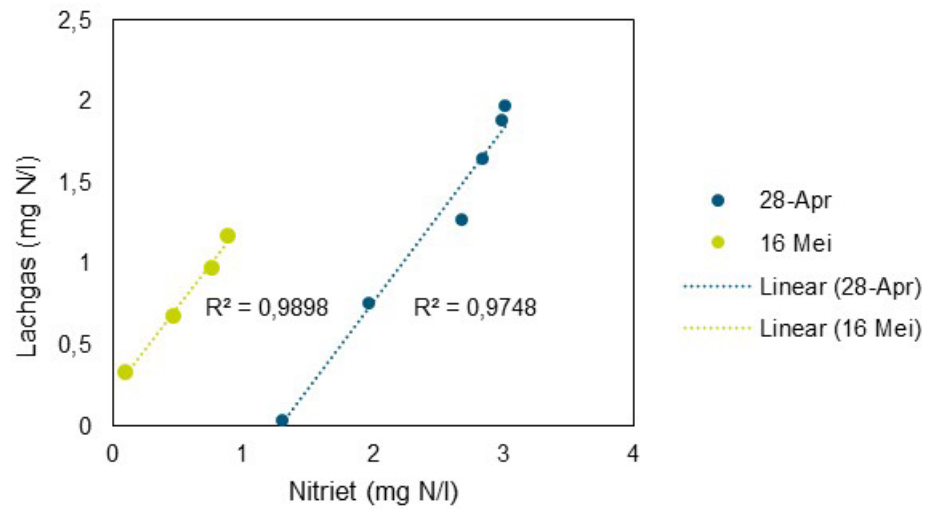


Uit de beschikbare data uit Nederland wordt dus nu geen duidelijke relatie waargenomen tussen de nitrietconcentratie in het effluent en de emissiefactor voor lachgas. Dit sluit aan bij de eerdere bevindingen in Nieuwegein¹ en Kralingseveer⁸. De data waar mee gewerkt wordt zijn alle maand- of daggemiddelde, terwijl zowel de nitrietconcentratie als de lachgasemissie sterk door de dag heen kunnen variëren.

Wanneer de nitrietconcentratie meer regelmatig (per uur) wordt gemeten zoals destijds in Nieuwegein is gebeurd, is wel een duidelijke relatie zichtbaar, zoals is weergegeven in Figuur 2.12.

8 STOWA, 2012, Emissie broeikasgassen vanuit RWZI's, rapport 2012 – 20.

FIGUUR 2.13 RELATIE NITRIETCONCENTRATIE EFFLUENT EN DE CONCENTRATIE LACHGAS IN DE WATERFASE (DATA VAN 2 MEETDAGEN OP DE ZUIVERING VAN NIEUWEGEIN)



Dit toont aan dat alleen bij de beschikbaarheid van continue lachgasmetingen een relatie tussen nitriet en lachgas onderzocht kan worden. De voorkeur is daarbij om deze metingen in de beluchtingstank te doen, omdat omzetting van nitriet mogelijk is in de nabezinktank en de directe relatie tussen de nitrietconcentratie en de gemeten lachgasemissie wegvalt.

3

MONITOREN EMISSIE LACHGAS

3.1 HET METEN VAN DE LACHGASEMISSIE

De emissie van lachgas uit rwzi's varieert sterk, want;

- Er zijn verschillen tussen rwzi's;
- Er zijn verschillen in de tijd (gedurende dag en tussen seizoenen) op elke rwzi;
- Er zijn verschillen binnen zowel de beluchte als de niet beluchte zones van elke rwzi

Om bovengenoemde redenen zijn altijd metingen nodig om de emissie op een rwzi vast te stellen. Er kunnen metingen in de gasfase en in de waterfase uitgevoerd worden. Om de verschillen in verschillende zones van het biologische proces kaart te brengen is het raadzaam op meerdere plaatsen in het proces te meten.

In de gasfase meten is mogelijk bij volledig afgedekte zuiveringen. Het meten van afgas van een geheel afgedekte tank is het meest accuraat voor het bepalen van de totale lachgas-emissie. Echter biedt dit type meting weinig inzicht in de vormingsprocessen van lachgas en zijn de meeste zuiveringen niet volledig afgedekt. Bij niet afgedekte biologische zuiveringen kan ten eerste de emissie van lachgas bepaald worden aan de hand van een drijvende box op het wateroppervlak. Het opgevangen gas wordt vervolgens met een GC (gaschromatografie) analyser geanalyseerd. Ten tweede zijn sensoren beschikbaar die lachgas meten in de vloeistoffase en vervolgens via een berekening worden omgezet naar een emissie. Met deze twee type metingen wordt meer inzicht verkregen in de vormingsprocessen van lachgas, maar is de bepaling van de totale lachgasmeting minder accuraat, maar voldoende accuraat om een goed beeld te krijgen van de totale emissie van de zuivering (zie ook STOWA 2019 – 05). De Nederlandse waterschappen hebben voornamelijk gekozen voor de toepassing van de sensor die lachgas meet in de vloeistoffase. Om die reden zal in het vervolg van dit rapport alleen deze meting in meer detail worden uitgewerkt.

3.2 MODELLEREN VAN LACHGASVORMING

Er bestaan verschillende wiskundige modellen die de al bekende microbiologische mechanismen waarbij N_2O gevormd wordt beschrijven.⁹ Deze modellen zijn gekalibreerd en gevalideerd met zowel data op laboratoriumschaal als op full-scale. Deze modellen zijn dermate ver ontwikkeld dat ze ingezet kunnen worden om locatie specifiek N_2O -emissies in te schatten. Het struikelblok is echter dat niet bekend is wanneer en onder welke omstandigheden welk van de verschillende mechanismen dominant is. Mogelijk leiden meerdere microbiologische processen gelijktijdig tot lachgasvorming. Dit maakt het kalibreren in de praktijk lastig. Om consequent en op robuustere wijze gegevens te verzamelen over de lachgasvorming, heeft op dit moment een directe meting daarom de voorkeur. De modellen zullen in de nabije toekomst ongetwijfeld meer ingezet kunnen gaan worden, aangezien er steeds meer kennis wordt opgedaan met betrekking tot lachgasvorming.

⁹ Ni, Bing-Jie et al. (2015), Recent advances in mathematical modeling of nitrous oxides emissions from wastewater treatment processes

3.3 LACHGASSENSOREN

Unisense (Denemarken) is vooralsnog de enige leverancier van sensoren die lachgas meten in de waterfase. Deze sensoren worden op de meeste zuiveringen gebruikt om de emissie van lachgas te meten, maar ook metingen in de gasfase vinden plaats. De sensoren worden geleverd met uitgebreide handleiding voor installatie en beheer. Het oplossen van problemen bij de installatie en beheer verloopt via e-mail, de ervaringen van de waterschappen met de sensoren en leverancier zijn goed. Op het moment van schrijven komen er meer spelers op de markt, maar vooralsnog is Unisense de grootste partij.

Unisense geeft naast onderhoudsvorschriften advies over het plaatsen van de meting op basis van de ervaringen die zijn opgedaan op rwzi Kralingseveer^{10 11}. Daarnaast zijn er aanbevelingen gedaan door het CoP op basis van ervaringen in de praktijk. Deze informatie is opgehaald door Waterschap Aa en Maas in de vorm van een gebruikersenquête. De ingevulde enquête is terug te vinden in Bijlage A1. Alle aanbevelingen zijn gebundeld om tot een ‘best practice’ te komen zoals beschreven in de hiernavolgende paragrafen.

3.4 PLAATSEN VAN DE LACHGASSENSOREN

Het is noodzakelijk om lachgas te meten over een periode waarin alle seizoensgebonden variaties worden meegenomen. Feitelijk betekent dit voor Nederland een periode van een jaar. Het meenemen van de periode van de winter tot en met het begin van het voorjaar is in ieder geval van belang voor een goed inzicht in de emissie van lachgas.

Het is belangrijk dat de volledige sensor zich onder water bevindt, en dat deze zo geplaatst wordt dat de sensor niet tegen de wand van de tank of andere harde onderdelen aan kan slaan: de sensor is kwetsbaar (zie Figuur 3.1 voor twee toegepaste methodes). De kabel van de sensor kan ondersteund worden met een ketting die vastgemaakt kan worden aan de kabelontlasting.

FIGUUR 3.1 INSTALLATIE LACHGASSENSOR IN LINKS NIEUWEGEIN IN STALEN PIJP EN RECHTS AAN EEN TOUW IN HET MIDDEN VAN HET BELUCHTINGSVELD IN SOERENDONK



10 Unisense tech note: “Influence of positioning of N₂O Wastewater Sensors: A case study from Kralingseveer WWTP, the Netherlands”

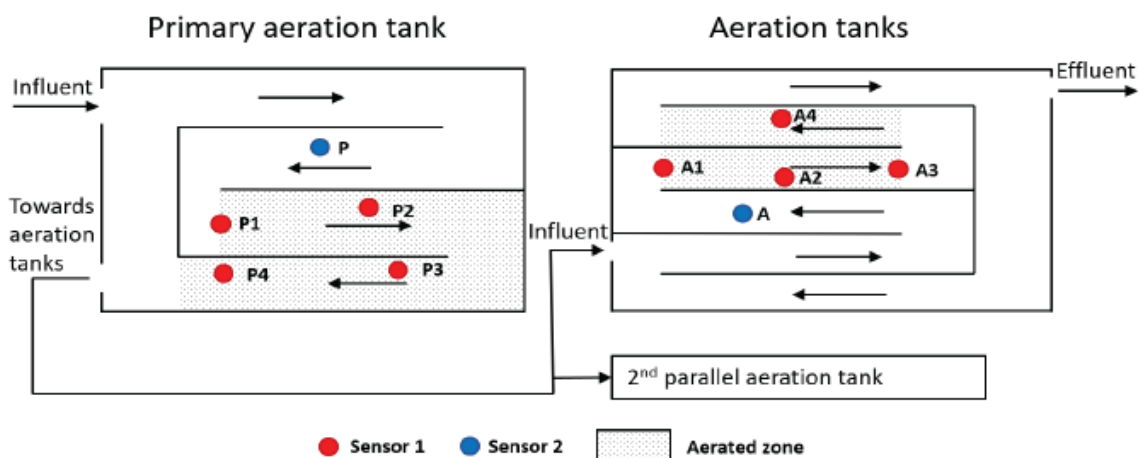
11 Unisense “N₂O system user manual”.

De lachgasconcentratie kan het beste met twee sensoren tegelijk gemeten te worden. Het uitgangspunt is namelijk dat lachgas wordt geëmitteerd in de beluchte zone(s), omdat het lachgas hier gestript wordt. Het is echter onzeker of lachgas hier ook (voornamelijk) gevormd wordt. Dit kan per installatie verschillen.

Eén sensor dient in eerste instantie ingezet te worden om de beste locatie in de nitrificatiezone (beluchte deel¹²) vast te stellen⁹. Het advies is om vier posities op gelijke afstanden van elkaar te kiezen en op elke positie een week lang te meten. Bij voorkeur in weken met soortgelijke condities (watertemperatuur, weersomstandigheden). Dit levert een gemiddelde concentratie gemeten lachgas per positie op. De sensor kan na de meetcampagne definitief geplaatst worden op de positie (of tussen twee posities in) waar de hoogste gemiddelde concentratie werd gemeten.

De tweede sensor wordt bij voorkeur vlak voor de beluchte zone in de anoxische zone(s) geplaatst, zodat hier de concentratie N_2O gemeten kan worden die in de navolgende beluchte fase gestript wordt. Zie Figuur 3.2 voor een schematische weergave van deze aanpak in een omloopsysteem. Voor overige procesconfiguraties (zoals een mUCT-, Phoredox-, of BCFS-installatie) met bellenbeluchting kan dezelfde meetstrategie toegepast worden en geldt dezelfde verwachting voor de best geschikte positie. Bij zuiveringen waarbij fysieke compartimentering de nitrificatiezones scheidt, is het zinvol om in de verschillende compartimenten te meten.

FIGUUR 3.2 SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN HOE DE GESCHIKTE MEETPOSITIE IN DE TANK BEPAALD KAN WORDEN. OVERGENOMEN UIT "INFLUENCE OF POSITIONING OF N_2O WASTEWATER SENSORS: A CASE STUDY FROM KRALINGSEVEER WWTP, THE NETHERLANDS"⁸

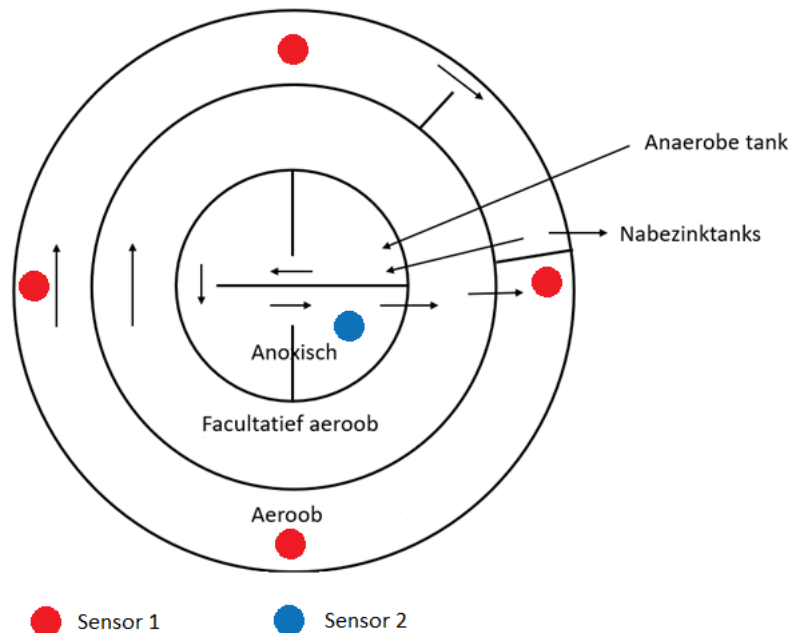


Stel dat er een meetcampagne opgezet wordt met dezelfde aanpak als in Kralingseveer, alleen op één van de overige configuraties, dan geldt opnieuw het advies om vier posities op gelijke afstanden te selecteren. Daarbij wordt op elke positie één week lang gemeten. Dit wordt schematisch weergegeven in Figuur 3.3. Daarna kan weer de positie met de hoogste gemiddelde concentratie geselecteerd worden. In een propstroomsysteem kan het nodig zijn om op meer dan vier posities in de tank te controleren op de lachgasconcentratie.

12 Met de beluchte zone wordt die zone bedoeld waarin de beluchting eigenlijk bijna altijd aanstaat, en dus niet de beluchte zones, waar de beluchting wordt bijgeschakeld bij pieken of hoge ammoniumconcentraties.

FIGUUR 3.3

BOVENAANZICHT ÉÉN VAN DE VIER AERATIE TANKS VAN RWZI LAND VAN CUIJK. HET BETREFT EEN PHOREDOX CONFIGURATIE MET PROPSTROOMBELUCHTING IN EEN ALTIJD AEROBE BUITENRING. ÉÉN SENSOR BEVINDT ZICH IN DE STRIKT ANOXISCHE ZONE (SENSOR 2 IN BLAUW), EN DE ANDERE SENSOR (SENSOR 1 IN ROOD) WORDT VERPLAATST OVER DE AEROBE ZONE WAAR DE BELUCHTING ALTIJD IN BEDRIJF IS OM DE POSITIE MET DE HOOGST GEMIDDELTE CONCENTRATIE TE BEPALEN IN DEZE ZONE¹³



Bij rwzi's met puntbeluchting dient één sensor vlak voor de puntbeluchter geplaatst te worden, en de andere sensor na de puntbeluchter in een deel dat niet beïnvloed wordt door de luchtinbreng zelf. Als er maar één sensor beschikbaar is kan de sensor het best op het grensvlak tussen eind anoxisch en begin beluchting geplaatst worden. Dit geldt voor zowel bellen- als puntbeluchting.

Voor en na de puntbeluchter dient er op drie posities op gelijke afstand van elkaar gemeten te worden om zo de meest geschikte positie vast te stellen. De andere sensor kan vast geplaatst worden in een deel dat niet beïnvloed wordt door de luchtinbreng.

De ervaring met betrekking tot het meten in batch reactoren is nog relatief beperkt. Er zijn metingen gedaan in het aerob korrelslibstelsysteem in Dinxperlo¹⁴, waar de meting in de waterfase diverse fasen van de cyclus doormaakt. Bij het interpreteren van data is het van belang dat data uit de niet volledig gemengde fasen (zoals bezinking of pulsbeluchting) niet representatief is voor de gehele reactor. Dit komt doordat in niet volledig gemengde fasen de concentratie van componenten varieert over de hoogte van de reactor. Naast de meting in de waterfase is ook de gasfase via een drijvende box geanalyseerd. Deze meting is noodzakelijk om de totale emissie te bepalen. Dit laatste is niet mogelijk met alleen de sensor in de waterfase, omdat de concentratie lachgas zal variëren over de hoogte en door de variatie in alfa factor niet kan worden omgerekend naar een lachgasemissie. De sensoren geven wel duidelijk meer informatie over waar en wanneer lachgasvorming optreedt.

¹³ Respons CoP lachgas Enquête

¹⁴ "Doctoraalproefschrift "Principles of the full-scale anaerobic granular sludge process", E.J.H. van Dijk. (TU/Delft). ISBN 978-94-6366-601-5

Enkele van de deelnemende waterschappen hebben de wens om in de deelstroomprocessen (deammonificatie reactoren) lachgasmetingen uit te gaan voeren. Ervaringen in Nederland zijn momenteel beperkt. Waterschap Aa en Maas heeft in 2022 in de DEMON installatie van rwzi Land van Cuijk metingen verricht. In België heeft Aquafin op rwzi Dendermonde ook een operationele lachgas meting in een deammonificatie proces. Resultaten van de metingen zijn bij het opstellen van dit rapport niet beschikbaar/opgevraagd, maar zijn zeker interessant om in de toekomst mee te nemen en het aantal metingen aan dit type systemen ook uit te breiden.

3.5 BEHEER EN ONDERHOUD VAN DE LACHGAS SENSOREN

Minimaal eens in de twee maanden dienen de sensoren gekalibreerd te worden. De sensoren dienen ook gekalibreerd worden als er een temperatuurverschil van $>3^{\circ}\text{C}$ ten opzichte van laatste kalibratiemoment optreedt. Gebeurt dit niet tijdig, dan dient er een correctie te worden uitgevoerd op de gemeten lachgasconcentratie om tot een goede kwaliteit van meetdata te komen. Bij dit temperatuurverschil kan een maximale standaardfout optreden van $\pm 5\%$ ¹⁵. De leverancier garandeert een levensduur van vier maanden per sensorhead, maar de sensorheads dienen in elk geval elke zes maanden vervangen te worden.

Waterschap Aa en Maas heeft in haar gebruikersenquête vragen gesteld over de ervaringen rondom het onderhoud van de lachgasmetingen, de antwoorden van enkele waterschappen zijn te vinden in bijlage A1. Er is gekozen om dit aan IMD Aquon uit te besteden.

3.6 VERWERKEN EN OMZETTEN VAN DE DATA

Voor het verwerken en omzetten van de lachgasconcentraties naar emissiedata zijn een drietal opties mogelijk die in de paragrafen 3.6.1, 3.6.2 en 3.6.3 worden beschreven. Bij iedere optie worden de voorwaarden, voor- en nadelen, en aandachtspunten weergegeven. Voor de offline-verwerking in Excel wordt daarnaast de methode beschreven.

3.6.1 GEBRUIK CONTROLLER UNISENSE

Bij de sensoren wordt een controller geleverd die het mogelijk maakt om real-time data te importeren naar de lokale PLC. Er is sprake van real-time wanneer de instantane lachgasconcentraties worden gebruikt om instantane lachgasemissies te berekenen. In de controller bestaan de gemeten concentraties en de berekende emissies als real-time gegevens. In een Historian database of bij nabewerking in Excel kan het zijn dat data wordt gemiddeld over een tijdsperiode (niet real-time).

Door te importeren kan de lachgasconcentratie gelezen worden in het SCADA-systeem. Bovendien is de controller uitgerust met software waarmee de lachgasconcentraties omgerekend worden naar lachgasemissies (dit geldt alleen voor systemen met bellenbeluchting). De berekende emissie kan daarna naar de PLC gestuurd worden. Om gebruik te maken van de real time lachgasemissies uit de controller dient de luchtstroom naar de beluchtingselementen (in m^3/h) vanuit de lokale PLC naar de controller gestuurd te worden. De luchtstroom kan ook in Nm^3/h naar de controller gestuurd worden, echter treedt er in dit geval een deviatie op van 3-7%¹⁶. In het vervolg van deze paragraaf wordt het beluchtingsdebiet in m^3/h weergegeven. Voor het berekenen van de lachgasemissie met behulp van de Unisense controller zijn twee kabels en twee PLC-aansluitingen nodig.

¹⁵ Zie pagina 54 van de handleiding van Unisense voor meer informatie

¹⁶ Informatie via Unisense.

3.6.2 AUTOMATISEREN IN DATAVERWERKINGSSYSTEEM VAN HET WATERSCHAP

De lachgasemissie berekeningen kunnen geautomatiseerd worden in onder andere Historian. De lachgasconcentratie wordt dan in de database automatisch omgezet naar de lachgasemissie. Dit kan door de lachgasconcentratie uit te sturen naar de PLC, zodat deze in SCADA en Historian komen te staan. Er is dan één vrije aansluiting in PLC en bijbehorende kabel benodigd.

De berekeningen dienen door het waterschap geprogrammeerd te worden (zie hiervoor bijlage A7), de berekende data kan worden opgenomen in Historian en Z-info. In vergelijking tot het gebruik van de controller van Unisense is er voor het automatiseren in het eigen dataverwerkingssysteem één kabel en één aansluiting minder benodigd, wel dient het waterschap zelf de programmatuur in te voeren, te beheren en te onderhouden.

De lachgasemissie van de beluchte zone kan berekend worden bij het gebruik van verschillende beluchtingstechnieken. Ook is een berekening voor de onbeluchte zone mogelijk. In de volgende paragrafen wordt beschreven welke gegevens er benodigd zijn om de lachgasemissie te berekenen in de verschillende situaties, namelijk: bij bellenbeluchting, puntbeluchting en in een anoxische zone. De berekeningen voor iedere situatie staan in bijlage A2 en A3. Om de berekeningen overzichtelijker te maken, zijn deze ook in een flowschema gezet (zie bijlage A4 tot en met A6). De totale lachgasemissie kan verkregen worden door de emissie in het beluchte en onbeluchte gedeelte bij elkaar op te tellen.

3.6.2.1 BELUCHTE ZONE (BELLENBELUCHTING)

Voor het berekenen van de lachgasemissie in een zuivering met bellenbeluchting zijn gegevens benodigd. Dit zijn variabele en vaste gegevens. De variabele gegevens zijn zuiveringsafhankelijk en worden weergegeven in Tabel 3.1. In bijlage A8 staan de tabellen met de vaste gegevens. Dit zijn onder andere constanten die in de formules van Unisense gebruikt worden.

TABEL 3.1 VARIABELE GEGEVENS VOOR HET BEREKENEN VAN DE LACHGASEMISSIE. HET VOLUME VAN HET BELUCHTE GEDEELTE IS HET TOTALE VOLUME VAN DE AEROBE ZONE(S) PLUS HET TOTALE VOLUME VAN DE FACULTATIEVE ZONE(S), MITS HIER DE BELUCHTING AAN STAAT

Grootheid	Eenheid	Betekenis
Q_{A-N}	Nm ³ /h	Luchttoevoer in de beluchte zone.
Q_A	m ³ /h	Luchttoevoer in de beluchte zone.
P_a	mbar	Overdruk pijpleidingen van de luchttoevoer.
T_{proces}	°K	Watertemperatuur in de beluchte zone.
D_R	m	Diepte van de beluchting in de aerobe zone.
V_R	m ³	Volume van het beluchte gedeelte.
S_{N20}	mg/m ³	Lachgasconcentratie in de beluchte zone.

Voor de variabele gegevens dienen tags aanwezig te zijn in Historian, behalve voor V_R . Q_{A-N} wordt omgerekend in Q_A (luchttoevoer in de beluchte zone in m³/h) in de emissieberekeningen. Het is zinvol deze berekende waarde mee te nemen in de dataregistratie.

3.6.2.2 BELUCHE ZONE (PUNTBELUCHTING)

Bij het automatiseren van de berekeningen op een zuivering met puntbeluchting horen de variabele gegevens uit Tabel 3.2 en de vaste gegevens uit Tabel 0.2 in A8.

TABEL 3.2 VARIABELE GEGEVENS (TAGS BENODIGD VOOR EEN BEREKENING IN HISTORIAN)

Grootheid	Eenheid	Betekenis
P	kWh	Vermogen puntbeluchters.
V_R	m^3	Volume beluchte gedeelte
V	%	Percentage beluchte gedeelte van de tank
SOTR	$kg O_2/h$	Standard Oxygen Transfer Rate.
AOTR	$kg O_2/h$	Actual Oxygen Transfer Rate
$O_2^{SatProces}$	$kg O_2/m^3$	Zuurstof verzadigingsconcentratie.
O_2^{Proces}	$kg O_2/m^3$	Zuurstofconcentratie in het proces
T_{Proces}	$^{\circ}C$	Temperatuur in het proces
$S_{N20,Tproces}$	mg/L	Gemeten lachgasconcentratie.
$r_{N20,i}$	g/dag	Lachgasemissie.

Voor de verzadigingsconcentratie van zuurstof kan worden overwogen deze automatisch te laten vullen als een functie van temperatuur en eventueel opgeloste stoffen.

3.6.2.3 ANOXISCHE ZONE

De variabele en vaste gegevens voor het berekenen van de lachgasemissie staan in Tabel 3.3 en Tabel 0.3 in bijlage A8.

TABEL 3.3 VARIABEL (TAGS BENODIGD VOOR EEN BEREKENING IN HISTORIAN).

Grootheid	Eenheid	Betekenis
$T_{proces}^{Anoxisch}$	$^{\circ}C$	Temperatuur van de anoxische zone
$S_{N20}^{Anoxisch}$	mg/m ³	Lachgasconcentratie in de anoxische zone

3.6.3 OFFLINEVERWERKING IN EXCEL

Wetterskip Fryslân heeft een berekeningsheet opgesteld in Excel¹⁷ waarmee meetdata kunnen worden omgezet in emissiegegevens. Deze rekensheet is echter alléén bruikbaar voor zuiveringen met bellenbeluchting. De Excel sheet van Wetterskip Fryslân wordt nog steeds gebruikt. Dit gebeurt parallel aan de protocollen die voor de geautomatiseerde berekeningen zijn opgesteld. Deze sheet is daarom gebruiksvriendelijker gemaakt en sluit aan op de wijze waarop data op zuiveringen verzameld wordt.

In tegenstelling tot wanneer de berekeningen handmatig worden ingevoerd in een nieuw Excel bestand, staan de berekeningen voor het bepalen van de lachgasemissie al in het geüpdatete bestand van Wetterskip Fryslân. Dit is alleen het geval voor het bepalen van de lachgasemissie in de anoxische zone en in een beluchte zone met bellenbeluchting. De benodigde vaste en variabele gegevens dienen nog wel te worden ingevoerd. In paragraaf 3.6.3.2 zijn de bijbehorende instructies bij het geüpdatete Excel bestand gegeven.

3.6.3.1 30 HANDMATIGE INVOER

Voor het berekenen van de lachgasemissies in Excel zijn gegevens benodigd. De gegevens verschillen per beluchtingstechniek en worden weergegeven in paragraaf 3.6.2. Er is enige tijd nodig voor een handmatige berekening in Excel. Als de lachgasemissies regelmatig berekend dienen te worden dan wordt er tijd bespaard door gebruik te maken van de Unisense controller of Historian.

¹⁷ Deze Excel sheet is via de site van STOWA separaat aan dit rapport te downloaden.

3.6.3.2 GEÛPDATETE EXCEL BESTAND

Eerst dienen de groen aangeduide gegevens te worden opgehaald. De op te halen gegevens zijn benoemd in de tabellen getoond onder 3.6.2. Gegevens die kunnen veranderen in de tijd hebben een interval van 5 minuten.

Hierna kunnen de gegevens in of onder de groene cellen in het tabblad invoer geplakt worden. Als gevolg hiervan komen er in het tabblad resultaten grafieken te staan. Deze bevatten de lachgasconcentratie, lachgasemissie en de CO₂-uitstoot van de blowers als functie van de tijd. Ook staan de waarden van de lachgasuitstoot in de aerobe- en anoxische zone vermeld, de totale lachgasuitstoot (uitgedrukt in kg N₂O en kg CO₂) en de CO₂ uitstoot van de blowers.

Het Geüpdatete Excel bestand is ontworpen voor het uitrekenen van de emissies per dag, maar deze kan aangepast worden voor emissies over meerdere dagen. Het Geüpdatete Excel is apart van deze rapportage te downloaden via de STOWA website.

4

OPLOSSINGSRICHTINGEN REDUCTIE EMISSIE LACHGAS

4.1 OBSERVATIES UIT 20 JAAR ONDERZOEK

4.1.1 DE AANLOOP NAAR LACHGAS ONDERZOEKEN OP RWZI'S IN NEDERLAND

Met de ondertekening van het Kyoto-protocol in 1997 heeft Nederland zich verplicht elk jaar de emissie van broeikasgassen te rapporteren. Om de emissie van lachgas door rwzi's te kwantificeren werd indertijd de door het IPCC in 1995 vastgestelde emissiefactor¹⁸ van één procent van de inkomende stikstofvracht gehanteerd, een richtlijn die door het toenmalige VROM¹⁹ werd overgenomen. De richtlijn was echter gebaseerd op één veldstudie bij een zuivering die niet was ontworpen voor stikstofverwijdering²⁰. De waterschappen gingen de verplichting aan om vanaf 2007 de uitstoot van broeikasgassen in het milieujaarverslag (MJV) te rapporteren voor de IPCC plichtige rwzi's²¹. In 2006 werd de emissiefactor voor lachgas van het IPCC vastgesteld op 0,5% van de inkomende stikstofvracht²². In 2019 is er een verfijning uitgebracht van de IPCC richtlijnen uit 2006, waarin de meest recente emissiefactor is opgenomen van 1,6%.²³

Volgend op de IPCC-publicatie van 1995 publiceerde de Europese DG XI (Directorate-General of the Environment, Nuclear Safety and Civil Protection) in 1998 een rapport²⁴ waarin de lachgasemissies in de Europese Unie nader in kaart waren gebracht. Hoewel de afvalverwerkingssector volgens het rapport een beperktere N₂O emissie heeft dan sectoren zoals de landbouw, werd afvalwaterzuivering genoemd als belangrijkste emissiebron binnen de afvalverwerkingssector.

In 2007 richtten de Nederlandse waterschappen zich op duurzaamheidsbeleid, waarmee eerst met de MJA-3 (2008) en MEE (2009) convenanten invulling aan werd gegeven. Deze convenanten waren met name gericht op het terugbrengen van energieverbruik en het verbeteren van energie efficiëntie, met zodoende een indirect effect op de broeikasgasemissies. Het Klimaatakkoord Unie en Rijk²⁵ wat in 2010 volgde richtte zich specifiek op een reductie van broeikasgasemissies uit rwzi's, wat een zeer concrete aanleiding gaf voor het opstarten van meer onderzoek naar de daadwerkelijke emissie van lachgas door rwzi's in Nederland. De eerste klimaatmonitor is opgesteld in 2012 over het verslagjaar 2011.

18 IPCC: Second assesment Climate Change (1995)

19 VROM Protocol 8136 (2008)

20 Global Water Research Coalition: N₂O and CH₄ emission from wastewater collection and treatment systems. State of the Science report. STOWA 2011-29

21 STOWA (2007). E-PRTR voor rwzi's. Rapport 2007-W-10

22 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories (2006)

23 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories

24 EU DGXI, AEA Technology Environment "Options To Reduce Nitrous Oxide Emissions" (1998)

25 Klimaatakkoord Unie en Rijk (2010-2020), Unie van Waterschappen

De impact van lachgasemissies op de CO₂ footprint van de waterschappen is volgens de klimaatmonitor relatief groot: het betreft circa 57% van de CO₂ footprint in de periode 2013-2021²⁶. In deze periode is volgens de klimaatmonitor nog geen noemenswaardige reductie van N₂O emissie bewerkstelligd. Hierbij dient wel rekening gehouden te worden met het feit dat deze emissie berekend is aan de hand van de IPCC emissiefactor van 1,6%, terwijl volgens STOWA deze emissiefactor een stuk lager lijkt te liggen.²⁷ Voor zuiveringen met een laag risico lijkt de emissiefactor rond de 0,5% te liggen (zie Hoofdstuk 2).

4.1.2 ACADEMISCH ONDERZOEK

Kennis over het ontstaan van lachgas op rwzi's bereikte de Nederlandse praktijk eerst vanuit academisch onderzoek. Hier wordt (een niet uitputtende) samenvatting gegeven. Op laboratoriumschaal werd in 2002 vastgesteld dat nitrificeerders onder aerobe condities blootstellen aan piekbelasting met ammonium kon zorgen voor meer N₂O emissie²⁸, dit ging gepaard met een opbouw van nitriet in de waterfase. Bij het falen van de beluchting werd hetzelfde patroon gevonden: een opbouw van nitriet en N₂O. Nitriet leek een belangrijke rol te spelen als tussenproduct voor N₂O.

Een literatuuronderzoek²⁹ van de TU Delft uit 2009 liet zien dat ook ander academisch onderzoek aangetoond heeft dat een verhoogde nitrietconcentratie in aerobe en/of anoxische ruimten een indicator was voor N₂O emissie. Daarnaast werd er gewezen op de invloed van lage zuurstofconcentraties in de aerobe zones, doorslag van zuurstof in de anoxische zones, en een lage CZV/N ratio van het influent op de emissie van N₂O. Naast de waterlijn van de rwzi's trok ook de deelstroombehandeling voor stikstofverwijdering aandacht in lachgas onderzoek³⁰.

Laboratoriumonderzoek met actief slib wees later uit dat via ammonium oxiderende bacteriën (AOB's) twee routes voor N₂O formatie bestaan³¹. AOBs denitrificeren nitriet onder aerobe condities naar N₂O als er veel nitriet aanwezig is. Daarnaast wordt N₂O gevormd door de oxidatie van hydroxylamine. De hydroxylamine route heeft een grotere N₂O emissie bij hoge concentraties van ammonium in de waterfase en bij lage concentraties van nitriet. Heterotrofe organismen vormen N₂O in anoxische condities bij de aanwezigheid van nitriet, of bij lage zuurstofconcentraties. Een tekort aan koolstof voor denitrificatie kan leiden tot onvolledige denitrificatie met N₂O als gevolg³². Het onderstaande figuur geeft een schematisch overzicht van de bekende formatieroutes van lachgas, voor nadere details wordt verwezen naar de wetenschappelijke literatuur.

26 Arcadis, "Klimaatmonitor Waterschappen", verslagjaar 2021, p65 (19-09-2022)

27 STOWA, 2019-05 Risico-inschatting emissie lachgas vanuit Nederlandse rioolwaterzuiveringen

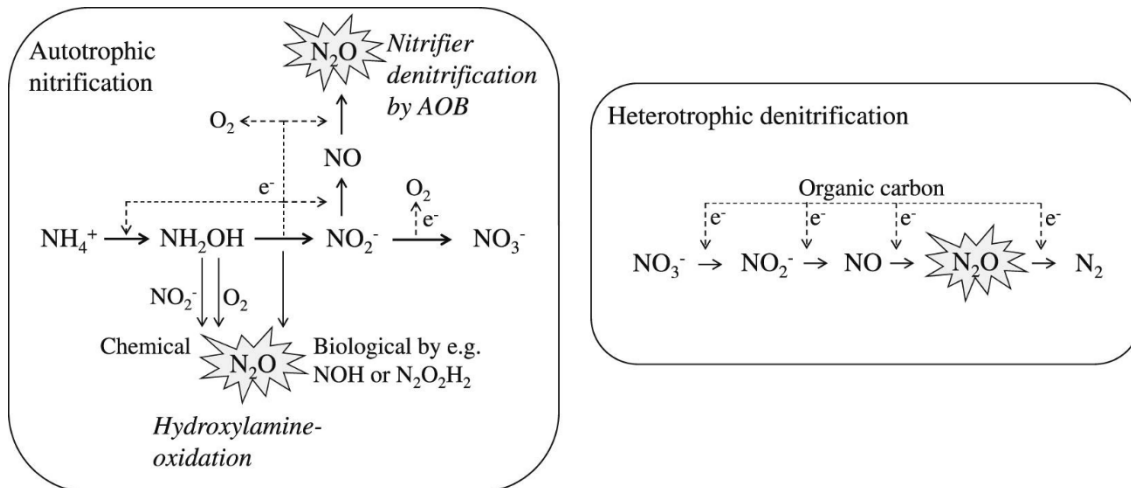
28 Burgess et al., (2002) Dinitrogen oxide production by a mixed culture of nitrifying bacteria during ammonia shock loading and aeration failure. *Journal of industrial microbiology and biotechnology*.

29 Kampschreur M., H. Temmink, R. Kleerebezem, M. van Jetten en M. Loosdrecht (2009). Nitrous oxide emission during wastewater treatment. *Water Research* nr 17, page. 4093-4103

30 Kampschreur et al., 2009, Emission of nitrous oxide and nitric oxide from a full-scale single-stage nitrification-anammox reactor. *Water Science and Technology* v60-12

31 Wunderlin et al., 2012, Mechanisms of N₂O production in biological wastewater treatment under nitrifying and denitrifying conditions. *Water Research* v46-4

32 Adouani et al. 2010, Effect of the carbon source on N₂O emissions during biological denitrification. *Resources, Conservation and Recycling*.

FIGUUR 4.1 OVERZICHT FORMATIEROUTES N₂O (WUNDERLIN ET AL. 2012)

Onderzoek naar N₂O emissie bij verschillende typen installaties heeft uitgewezen dat er variaties bestaan in de emissies tussen verschillende typen zuiveringssystemen, alsook binnen deze typen zuiveringssystemen³³. In zowel het ontwerp en de procesaansturing zijn voor wat betreft lachgasemissie winsten te behalen.

Aan de TU Delft wordt gewerkt aan een onderzoek die kijkt naar de onderliggende microbiologie van N₂O omzettingen. In dit onderzoek wordt gekeken op welke wijze variaties in de lachgasemissie (bijvoorbeeld de seizoensvariatie) gerelateerd kan worden aan de wijze waarop de zuivering gestuurd wordt en wat de (eiwit)activiteit is van de diverse betrokken bacteriën bij de stikstofomzetting.

4.1.3 PRAKTIJKONDERZOEK OP RWZI'S IN NEDERLAND

Het eerste praktijkonderzoek in Nederland

De inkt van het klimaatakkoord Unie en Rijk was nog maar net droog en het eerste STOWA rapport³⁴ over praktijkonderzoek naar broeikasgasemissies op rwzi's kwam uit. Het onderzoek had als doel om de mate van N₂O en CH₄ emissies van rwzi's te bepalen om inzicht te verkrijgen in de bruikbaarheid van de tot dan toe gehanteerde emissiefactoren van het IPCC en het VROM.

In dit STOWA project werd gedurende een week continu lachgas gemeten in de gasfase. Dit werd gedaan bij drie rwzi's in Nederland: Papendrecht, Kortenoord, en Kralingseveer. In Kralingseveer werd tweemaal gemeten om de effecten van temperatuur op de emissie te verkennen. De gemeten emissie bleek een sterke variatie in de tijd te vertonen en voor de drie rwzi's konden geen eenduidige emissiefactoren worden afgeleid. Het leek dat de laagbelaste rwzi's Papendrecht en Kortenoord een kleinere N₂O emissie hadden dan de tot dan toe aangenomen waarden, en de hoger belaste rwzi Kralingseveer een hogere emissie. In Kralingseveer werd voor de februari meting een verband tussen de N₂O emissie en het nitraatgehalte gevonden, en werd nitrietophoping tijdens nitrificatie als mogelijke oorzaak gezien van de hoge N₂O emissies.

³³ Dijk, van, E. et al., 2021 and Vasilaki et al., 2019

³⁴ Emissies van broeikasgassen van rwzi's. STOWA Rapport 2010-08.

Het aandeel van N₂O in de broeikasgasemissie was voor Kralingseveer hoog 21% (oktober) en 88% (februari), terwijl het aandeel bij Kortenoord en Papendrecht relatief beperkt was (beiden < 3%).

De aanbeveling werd gedaan om in vervolgonderzoek nader te kijken naar de relatie tussen N₂O en stikstofbelasting en nitrietconcentraties, alsook variaties in de aanvoer en temperatuur, en om dit te doen met een één jaar durende continue monitoring. Met behulp van andere procesdata konden dan correlaties met de andere procesparameters worden onderzocht.

GWRC Rapport 2011

De resultaten van het eerste praktijkonderzoek in Nederland werden gedeeld met de Global Water Research Coalition (GWRC) en werden in 2011 meegenomen in een internationale samenvatting van de staat van onderzoek naar N₂O en CH₄³⁵. De conclusie dat de variatie in emissie van N₂O te groot was om met generieke kengetallen te werken werd daar onderschreven, alsook de noodzaak om met langdurende on-line metingen te werken om de daadwerkelijke emissie vast te stellen. Ook werd benoemd dat de voornaamste bron van lachgas in rwzi's in de nitrificatieprocessen te vinden is.

Verder werd in het rapport van de GRCW een aanzet tot een risicomodel gemaakt waarin werd gesteld dat:

- Nitrietaccumulatie leidt tot meer N₂O emissie;
- Sterke variaties in belasting over de dag N₂O emissie in de hand werken;
- Een lage effluentwaarde voor stikstof hand in hand gaat met een lage N₂O emissie;
- Hoge waarden voor organische stikstof in het effluent N₂O emissie in de hand werken.

Nader onderzoek werd voorgesteld naar de variabiliteit van emissie over het jaar heen, mitigatiestrategieën, emissie van nog onbekende bronnen, en de preciezere verhouding tussen de bijdrage van autotrofe en heterotrofe organismen aan de N₂O productie.

Het tweede praktijkonderzoek in Nederland

In navolging van het eerste praktijkonderzoek werd een tweede praktijkonderzoek gestart, waarvan het rapport³⁶ in 2012 verscheen met omtrent N₂O de doelstellingen om:

1. De relatie tussen stikstofbelasting en/of nitrietconcentratie en lachgas te onderzoeken;
2. De voorwaarden vast te stellen voor het meetprotocol waarvan de resultaten een goede inschatting geven van de jaarlijkse emissie van lachgas op een rwzi;
3. Te achterhalen welke rol ammonium, nitriet, temperatuur, luchtdebiet, en DO spelen bij de vorming van lachgas tijdens de nitrificatie;
4. Te achterhalen welke rol nitriet, DO, en de CZV/N verhouding spelen bij de vorming van lachgas tijdens de denitrificatie.

In het onderzoek werd een jaar lang gemeten op rwzi Kralingseveer met behulp van afgasmetingen. Dit gebeurde op een 4-tal punten in de biologische ruimten. Ook werden proeven op laboratoriumschaal uitgevoerd met het slib van Kralingseveer. De resultaten van de metingen werden gecorreleerd met de data afkomstig van andere metingen in het proces.

35 GRCW: N₂O and CH₄ emission from wastewater collection and treatment systems. State of the Science report.

36 Emissie broeikasgassen vanuit rwzi's, STOWA rapport 2012-20

Rondom de correlatie met nitriet en stikstofbelasting werd geconcludeerd dat:

1. Nitrietconcentraties in de rwzi of stikstofbelasting op zichzelf geen goede indicator voor de gemeten lachgas emissie zijn;
2. Lachgasmetingen noodzakelijk zijn om de emissie te bepalen.

Daarnaast werden adviezen gegeven voor ontwerp en beheer om de lachgasemissie te reduceren:

1. Het beheersen van de zuurstofconcentraties in de zuivering (niet over- of onderbeluchten);
2. Het aantal overgangen tussen anoxische en aerobe zones beperken om overgangszones met een laag zuurstofgehalte te voorkomen;
3. Het zoveel mogelijk verlagen van de ammoniumconcentratie in de zuivering;
4. Voldoende denitrificatieruimte te voorzien om tijdens nitrificatie gevormd N_2O weg te nemen.

Aanbevolen werd om met behulp van de risicomatrix in het GWRC-rapport uit 2011 de Nederlandse rwzi's in te delen in de risicocategorieën *laag*, *gemiddeld*, en *hoog*, en metingen uit te voeren over het brede spectrum van deze matrix om vast te stellen of dit risicomodel zou leiden tot een over- of onderschatting van de emissie.

Verder werd aanbevolen om bij het meten bij rwzi's het effect van de mitigatiemaatregelen in kaart te brengen om zo de reductie die kan worden bewerkstelligd in te schatten, en zo invulling te kunnen geven aan het klimaatakkoord.

Verificatie van het risico-model emissie lachgas vanuit Nederlandse rioolwaterzuiveringen

In navolging van het tweede praktijkonderzoek zijn verificatiemetingen verricht voor de risico-inschatting voor N_2O emissie bij rwzi Soerendonk en rwzi Nieuwegein. Daarbij is specifiek gekeken of op basis van ammonium en nitrietwaarden in het effluent een betrouwbare risico-inschatting kon worden gemaakt van de lachgasvorming in de praktijk.³⁷

Data van de rwzi's van Wetterskip Fryslân, Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden, Waterschap Brabantse Delta, Waterschap Vechtstromen, Waterschap Scheldestromen, Waterschap De Dommel, Waterschap Hunze & Aa's, Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier, en Waternet zijn gebruikt om het risicomodel in te vullen. Ongeveer 15% van de rwzi's werd een hoge risico-inschatting toegekend, en meer dan de helft van de rwzi's kreeg een lage risicoinschatting.

Bij de verificatiemetingen zijn sensoren gebruikt die lachgas meten in de waterfase, binnen de studie is eveneens gekeken naar de betrouwbaarheid van dit type metingen door bij Amsterdam-West een vergelijk te maken met afgasmetingen. Dit is hier mogelijk omdat de aeratietank is afgedekt.

De conclusies van de studie waren dat de online sensoren konden worden benut om de emissie te meten mits het ingebrachte luchtdebiet bekend is, en dat de nitriet en ammoniumwaarden in het effluent voldoende basis waren voor een eerste risico-inschatting. Dit laatste heeft geleid tot een risicomodel voor de Nederlandse praktijk (zie hoofdstuk twee). Daarmee kunnen de rwzi's waar de emissie waarschijnlijk het hoogst is snel worden herkend op basis van data uit (reguliere) monsternamen, waarna metingen en mitigerende maatregelen gericht kunnen worden ingezet daar waar ze het meest effectief zijn.

37 "Risico-inschatting emissie lachgas vanuit Nederlandse Rioolwaterzuiveringen" STOWA rapport 2019-05

4.2 LESSONS LEARNED UIT HET COP LACHGAS

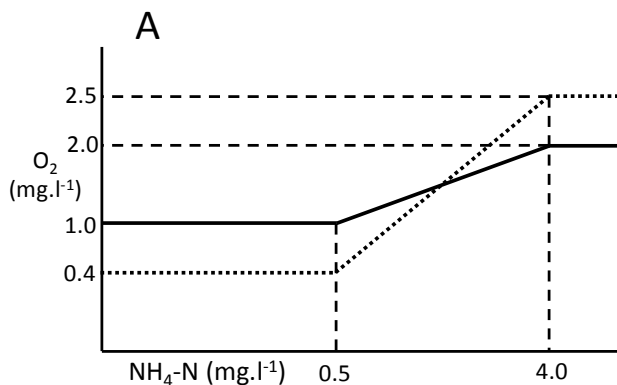
Sinds oprichting van het CoP zijn een aantal waterschappen continu lachgas aan het meten. In maart 2022 heeft er in CoP-verband een brainstorm plaatsgevonden waarin een aantal thema's is besproken waarvan in de praktijk is ondervonden dat deze invloed lijken te hebben op N₂O-emissie. Deze worden in de volgende paragrafen verder toegelicht. In het verlengde hiervan zijn ook mogelijke mitigatiemaatregelen onder de aandacht gebracht, deze worden besproken in Hoofdstuk 5.

4.2.1 BEHEERSEN VAN HET ZUURSTOFGEHALTE

De zuurstofconcentratie en vooral hoe de beluchtingsregeling is opgebouwd heeft invloed op de hoeveelheid N₂O die gevormd wordt in de zuivering. Grote fluctuaties in zuurstofconcentratie dienen zoveel mogelijk te worden vermeden. Het aanpassen van de beluchtingsregeling om dit te bewerkstelligen is relatief simpel. Bijkomend voordeel, naast het verminderen van de lachgasemissie, is dat een dergelijke aanpassing ook kan leiden tot een lagere NH₄⁺-concentratie in het effluent. Een nadeel is echter dat het inbrengen van meer zuurstof ook meer energie kost en zodoende de CO₂ footprint verhoogt. Onder aan de streep zal het terugdringen van de N₂O-emissie de CO₂ footprint echter verlagen, zeker omdat lachgas een sterk broeikasgas is (1 kg N₂O komt overeen met 256 kg CO₂).

Voor rwzi Land van Cuijk (Waterschap Aa en Maas) werd de beluchtingsregeling aangepast. Deze nieuwe beluchtingsstrategie resulteerde in lagere N₂O-concentraties. De beluchtingsregeling bestaat uit zuurstofsetpoints die gekoppeld zijn aan de ammoniumconcentraties 0,5 en 4,0 mg/L. De oorspronkelijke zuurstofsetpoints waren 0,4 mg/L en 2,5 mg/L. De zuurstofsetpoints in de nieuwe beluchtingsstrategie waren 1,0 mg/L en 2,0 mg/L zuurstof. Beide beluchtingsstrategieën staan schematisch weergegeven in Figuur 4.3.

FIGUUR 4.2 REGULIERE BELUCHTINGSREGELING RWZI LAND VAN CUIJK (LVC) AANGEDUID MET STIPPELLIJN EN DE NIEUWE BELUCHTINGSREGELING MET DOORGETROKKEN LIJN³⁸

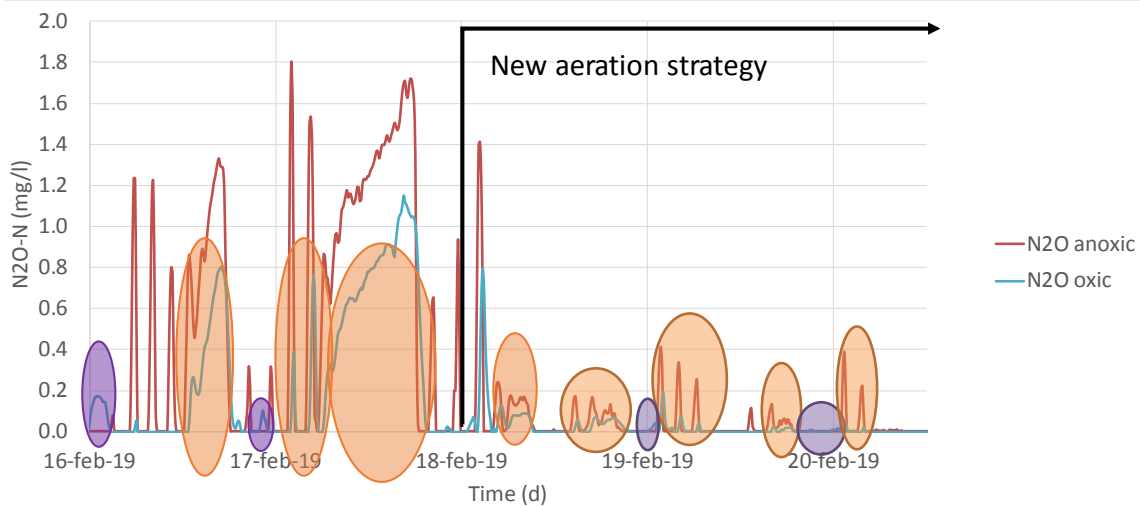


In Land van Cuijk is lachgas gemeten terwijl de bestaande of de nieuwe beluchtingsstrategie werd toegepast. Er werd één week getest met de reguliere strategie en één week met de nieuwe strategie in de winterperiode. Hier werd een lachgasreductie waargenomen van 85%. Dit percentage is gebaseerd op de gemeten lachgasconcentraties in de anoxische en aerobe zone. Om hier een beeld van te geven, staan de gemeten lachgasconcentraties bij beide beluchtingsstrategieën in Figuur 4.4. In de grafiek is te zien dat bij de oude regeling (linkerdeel) de hoge zuurstofconcentraties (2,5 mg/l; oranje grote cirkels) leidt tot hoge lachgasconcentraties. In de kleinere paarse cirkels is de zuurstofconcentratie laag (0,5 mg/l) en leidt bij de oude regeling tot kleine pieken in de lachgasconcentratie. Bij de nieuwe regeling (rechterdeel)

³⁸ Waterschap Aa en Maas, praktijkonderzoek rwzi Land van Cuijk (2019), M. van den Ham

grafiek) is te zien dat door de aanpassing van de zuurstofsetpoints de pieken in lachgas duidelijk veel lager zijn dan bij de oude regeling.

FIGUUR 4.3 LACHGASEMISSIE(S) BIJ DE REGULIERE EN DE NIEUWE BELUCHTINGSSTRATEGIE UIT ONDERZOEK BIJ AA EN MAAS.³⁹ DE ORANJE (GROTERE) CIRKELS GEVEN DE MOMENTEN AAN WAARBIJ DE ZUURSTOFCONCENTRATIE HOOG, DE PAARSE KLEINERE CIRKELS GEVEN DE MOMENTEN AAN WAARBIJ DE ZUURSTOFCONCENTRATIES LAAG WAREN



De meetcampagne was van korte duur en vond plaats in februari. Daarom vond er een vervolgonderzoek plaats, waarbij de lachgasemissie reductie werd gevalideerd binnen de periode van 20 april 2020 tot en met 13 juli 2020. Tijdens deze periode werd er iedere twee weken gewisseld tussen de beluchtingsstrategieën (regulier/nieuw). Uit dit vervolgonderzoek kwam een lachgasemissie reductie van 35%.⁴⁰

In 2021 zijn de trends in lachgasemissie op land van Cuijk verder bestudeerd. Hieruit bleek dat het starten en stoppen van de facultatieve beluchting leidt tot hoge of lage zuurstofconcentraties in de aerobe zone. De beluchting in de aerobe zone is namelijk niet afgesteld op de facultatieve beluchting die hiervoor plaats vindt. De sterke variatie in zuurstofconcentraties die hierbij ontstaat kan leiden tot pieken in de lachgasconcentratie.

Ook op rwzi Heerenveen (Wetterskip Fryslân) is de beluchtingsregeling aangepast. In 2019 is er een PID-regeling aangenomen die het zuurstofsetpoint regelt op basis van NO_x of NH_4^+ of PO_4^{3-} . Voorheen werd het zuurstofsetpoint in stappen aangepast. De huidige PID-regeling bepaalt het gewenste zuurstofsetpoint nauwkeuriger op basis van de NO_x^- , NH_4^+ , of PO_4^{3-} concentratie en de bijbehorende ingestelde grenswaarden, waardoor er stabiel belucht kan worden. Als er meerdere concentraties hoger zijn dan de ingestelde grenswaarde is de NO_x^- -concentratie dominant. Dit is een maatregel om overbeluchting te voorkomen. Daarnaast is er een aanpassing gedaan aan de beluchtingscapaciteit. Beide veranderingen hebben gezorgd voor lagere concentraties NH_4^+ in het effluent, of dit ook geldt voor nitriet is niet bekend. Dit leidt tot de verwachting dat dit ook geleid heeft tot lagere lachgasemissies. Het BZV-rijke water dat werd aangevoerd door een industriële lozer uit Heerenveen kan ook een verlagend effect hebben gehad op de lachgasemissie. De betreffende fabriek is opgestart in begin 2020, ongeveer een half jaar na het aannemen van de PID-regeling.⁴¹ Data om de impact van de aanpassing van de beluchtingsregeling en het aansluiten van een nieuwe industriële lozer ontbreken vooralsnog.

³⁹ Waterschap Aa en Maas, praktijkonderzoek rwzi Land van Cuijk (2019), M. van den Ham

⁴⁰ Waterschap Aa en Maas, praktijkonderzoek rwzi Land van Cuijk (2020), E. Gootzen

⁴¹ Correspondentie Sybren Gerbens, Wetterskip Fryslân.

Op rwzi Eindhoven (Waterschap de Dommel) is met behulp van 24-uurs-testen aangetoond dat de zuurstofconcentratie effect heeft op de N_2O -vorming.⁴² De beluchtingsregeling lijkt een instrument om iets aan de lachgasemissie van een rwzi te doen. Dit is gebleken uit onder meer proeven bij rwzi Land van Cuijk⁴³, rwzi Soest-Baarn⁴⁴, rwzi Zwolle⁴⁵, rwzi Eindhoven⁴⁶, rwzi Zeist⁴⁷ en rwzi Dinxperlo⁴⁸. Een sturing met stabielere zuurstofwaarden in de aerobe zone(s) die bovendien niet te laag (kleiner dan 1 mg/l) zijn wordt aanbevolen.

4.2.2 SLIBEIGENSCHAPPEN

Op rwzi Kralingseveer (Hoogheemraadschap Schieland en Krimpenerwaard) lijkt er een correlatie te bestaan tussen de slibconcentratie (relatief hoog) en de N_2O -emissies (ook relatief hoog). Zuivering Amsterdam West heeft in 2019 te maken gehad met een situatie waarin er tijdelijk geen slib kon worden afgelaten en de slibconcentratie in de beluchtingstank opliep. De stijging in slibconcentratie leidde ook hier mogelijk tot verhoogde lachgasemissies. Het hogere slibgehalte vergroot de luchtbehoefte en dit kan invloed hebben gehad op het zuurstofgehalte als de beluchtingscapaciteit beperkend is. Een te laag zuurstofgehalte kan vervolgens N_2O emissie in de hand werken.⁴⁹ Aan de andere kant leidt een hoger slibgehalte tot een lagere slibbelasting wat bij voldoende beluchtingscapaciteit de emissie van lachgas kan verminderen. Vooralsnog ontbreken de data om de invloed van slibeigenschappen op de vorming en emissie van lachgas in te schatten.

In het algemeen zijn er echter weinig (duidelijke) resultaten beschikbaar met betrekking tot de relatie tussen N_2O -vorming en slibconcentratie. Het stabiel houden van de slibleeftijd en de slibbelasting, en het langzaam op- of afbouwen van de slibconcentratie heeft naar verwachting een positief effect op de N_2O -vorming.⁵⁰ Duiding van bestaande data en het uitvoeren van aanvullend onderzoek is hiervoor nodig.

4.2.3 RETOURSTROMEN MET HOGE ZUURSTOFCONCENTRATIE

Op awzi Schiphol (Evides Industriewater) wordt voornamelijk N_2O geëmitteerd vanuit de aerobe zone (zie Figuur 4.5). De N_2O emissie in de aerobe zone is gebaseerd op de concentratie in de anoxische zone, omdat daar de meeste lachgasformatie wordt waargenomen.⁵¹ De lachgasemissie is berekend met de formules voor de aerobe zone, ervan uitgaand dat het gevormde lachgas uit de anoxische zone wordt gestript in de aerobe zone. Er lijkt een relatie te zijn tussen de lachgasemissie en de hoge zuurstofconcentratie in de aerobe zone. Zuurstof kan namelijk gedeeltelijk teruggevoerd worden naar de anoxische zone via de retourstroom. Onder aerobe omstandigheden kan in de anoxische zone lachgas ophopen, omdat het denitrificatieproces wordt geremd. Naast remming speelt ook mee dat een kleiner gedeelte van de denitrificatiezone echt anoxisch is en de denitrificatiecapaciteit dus minder is.

De hoge zuurstofconcentratie aan het einde van de aerobe tank vallen samen met hoge lachgasemissies tijdens de periode 20-12-2021 tot 19-4-2022 (zie Figuur 4.5). Hierna is Aquasuite PURE geïnstalleerd voor het aansturen van de beluchtingsregeling. Deze regeling

42 "Brainstormsessie lachgasemissies reduceren op de rwzi" 03-03-2022

43 Waterschap Aa en Maas, praktijkonderzoek rwzi Land van Cuijk (2019), M. van den Ham

44 Waterschap Vallei & Veluwe, praktijkonderzoek rwzi Soest-Baarn (2021)

45 CoP Lachgas 16/9/2020. Presentatie door TAUW over interpretatie van lachgasmetingen van rwzi Zwolle met machine learning. Lager redoxpotentiaal, en of NH_4 -N concentraties aerobe zone. D.m.v. beluchting

46 Waterschap de Dommel, praktijkonderzoek rwzi Eindhoven

47 Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden, praktijkonderzoek rwzi Zeist (2020)

48 Dijk, van, E. et al., 2021

49 Correspondentie Marcel van Zandvoort, Waternet.

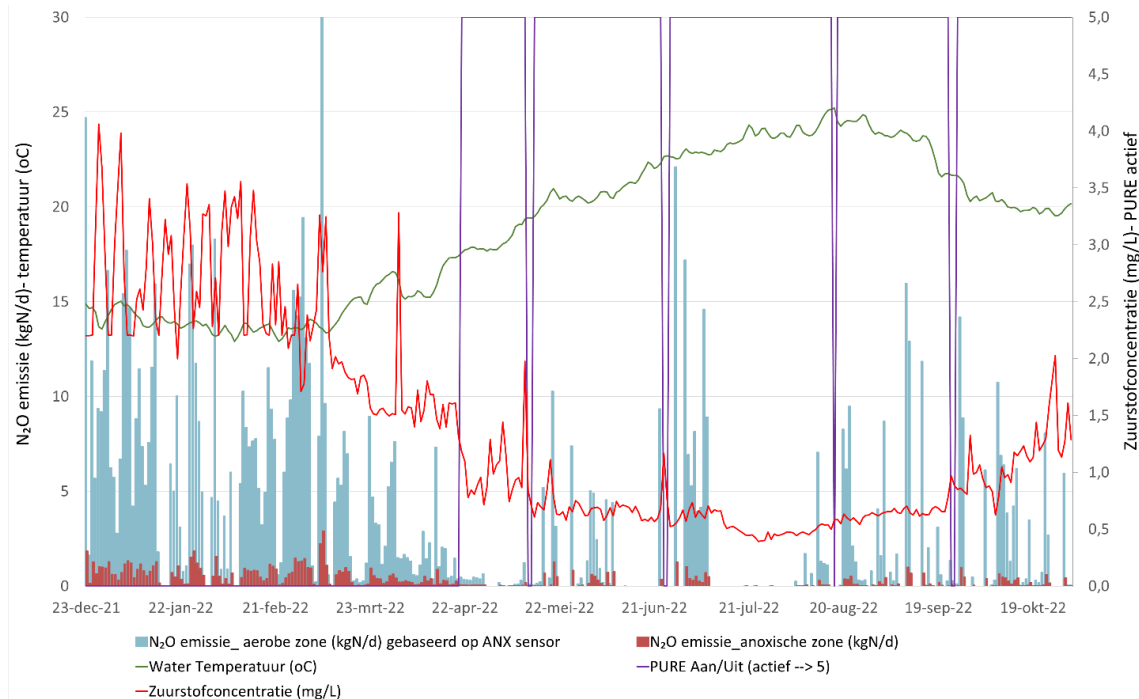
50 "Brainstormsessie lachgasemissies reduceren op de rwzi" 03-03-2022

51 Correspondentie Ioanna Gkoutzamani, Evides

beïnvloedt de zuurstofregeling, de zuurstofconcentratie, en de terugstroom van zuurstof vanuit de aerobe zone. De impact daarvan op de lachgasemissie is nog niet bekend.

Verder lijkt de lachgasemissie te dalen als de temperatuur stijgt. Daarom is in Figuur 4.5 ook de daggemiddelde temperatuur weergegeven. De temperatuur is een belangrijke factor, niet alleen op awzi Schiphol. Daarom wordt hier in paragraaf 4.2.5 verder op ingegaan.

FIGUUR 4.4 LACHGASEMISSIE(S) MET BIJBEHORENDE DATA AWZI SCHIPHOL



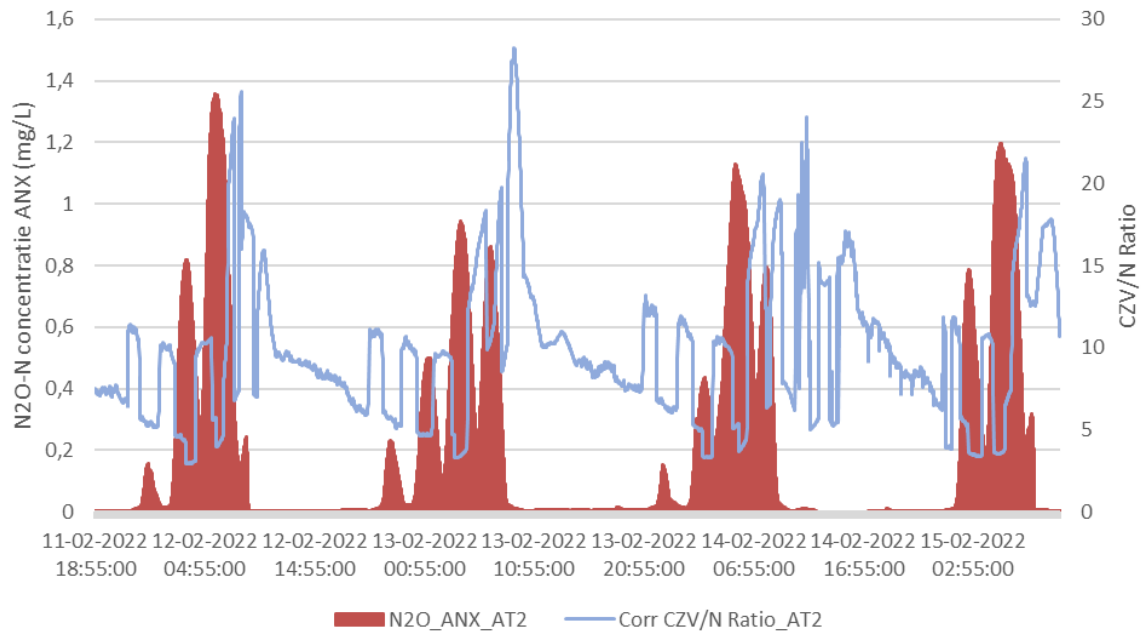
Op rwzi Land van Cuijk (Waterschap Aa en Maas) is geëxperimenteerd met het optimaliseren van de beluchting in de facultatieve zone door deze continu op een vaste capaciteit te laten beluchten. Deze zone bevindt zich voor de aerobe zone en wordt normaliter gebruikt om extra te beluchten bij hoge NH_4^+ -vrachten. Het plotseling in gebruik nemen van de facultatieve beluchting leidt tot extra zuurstof in het aerobe gedeelte. Dit kan terugstromen via de retourstroom en pieken in lachgasconcentraties in de anoxische zone veroorzaken.⁵² Het is ook mogelijk dat bij het aanzetten van de beluchting, al gevormd lachgas direct wordt gestript. Het onderscheid tussen vorming van lachgas en/of strippen door het plotseling aanzetten van de beluchting is moeilijk te maken. Duiding van bestaande data en het uitvoeren van aanvullend onderzoek kan hier meer inzicht in geven.

4.2.4 CZV/N RATIO

Op awzi Schiphol is er weinig makkelijk afbreekbaar CZV aanwezig in verhouding tot de binnenkomende hoeveelheid stikstof. Er wordt daarom C-bron gedoseerd om de CZV/N ratio te verhogen om zo het denitrificatieproces te stimuleren. Hierbij blijkt uit data van awzi Schiphol dat er een verband lijkt te bestaan tussen de CZV/N ratio en de lachgasemissie. Wanneer de CZV/N laag is, lijkt data van awzi Schiphol erop te wijzen dat de lachgasemissie hoger is, zie Figuur 4.6.

52 Correspondentie Robert Kras, Waterschap Aa en Maas.

FIGUUR 4.5 CZV/N RATIO'S MET CORRESPONDERENDE LACHGASCONCENTRATIES IN DE ANOXISCHE ZONE VAN AWZI SCHIPHOL



Uit de trends van bovenstaande figuur komt naar voren dat de lachgasconcentratie in de anoxische zone stijgt wanneer de CZV/N verhouding laag is. Op het moment dat de CZV/N verhouding wordt verhoogd daalt de lachgasconcentratie weer. De impact op de effluentconcentraties ammonium en nitraat is niet bekend. Duiding van bestaande data en het uitvoeren van aanvullend onderzoek is hiervoor nodig.

Het intermitterend lozen van hoog beladen stikstofstromen uit de deelstroombehandeling kunnen mogelijk een invloed hebben op de lachgasproductie⁵³, maar dat is nog niet vastgesteld.

4.2.5 TEMPERATUUR

Zoals eerder benoemd in paragraaf 4.2.3 heeft de temperatuur effect op de lachgasemissie. Uit onderzoek van Kampschreur et al. is gebleken dat lage temperaturen tot nitrietaccumulatie kunnen leiden en daarmee meer lachgasemissie.⁵⁴ In een ander onderzoek werd voor CAS-systemen beschreven dat lagere temperaturen effect hebben op de lachgasemissie tijdens de winter, maar ook tijdens het begin van de lente, wanneer de temperatuur juist stijgt.⁵⁵ De temperatuur heeft een seizoensgebonden patroon die ieder jaar opnieuw voorkomt. Het is belangrijk om dit patroon mee te nemen in het analyseren en evalueren van de data. Dit is ten behoeve van het verifiëren van trends in de lachgasemissie, maar ook eventuele onderzoeksresultaten.

4.2.6 RWA CONDITIES

RWA zorgt voor fluctuaties in het influent debiet, wat het systeem kan verstoren en tot meer lachgasemissie leidt. Het verdient de aanbeveling rekening te houden met de verschillen tussen DWA en RWA wanneer datasets worden geanalyseerd.

53 Wetterskip Fryslan, praktijkonderzoek rwzi Heerenveen (2019)

54 M. Kampschreur, H. Temmink, R. Kleerebezem, M. van Jetten en M. Loosdrecht (2009). Nitrous oxide emission during wastewater treatment. *Water Research* nr 17, page. 4093-4103

55 E.J.H. van Dijk, M.C.M. van Loosdrecht en M. Pronk (2021). Nitrous oxide emission from full-scale municipal aerobic granular sludge (2021). *Water Research* nr 198

4.2.7 LAGE $\text{NH}_4\text{-N}$ STUURWAARDE

Voor rwzi Zwolle wordt sturen op een laag $\text{NH}_4\text{-N}$ gehalte in het effluent benoemd als indicator voor lage emissies⁵⁶, het verband werd gevonden door middel van machine learning. Hoewel het verband niet als zijnde causaal is aangetoond past het verband wel bij de verwachting dat een lagere groeisnelheid van AOB (bij lagere ammonium concentraties) leidt tot minder lachgasemissie.

4.2.8 OVERIGE AANKNOPINGSPUNTEN

Bij rwzi Soest⁵⁷ werd aangetoond dat de mate van denitrificatie een verband heeft met de lachgasproductie. Het voorkomen van lage DO-concentraties is wellicht mogelijk door puntbeluchting te vervangen voor bellenbeluchting⁵⁸. Een stabiele bedrijfsvoering lijkt tot lagere emissies te leiden, omdat het optimaliseren van de recirculatiestroom en de zuurstof-regeling voor lagere emissies kunnen zorgen.

56 Waterschap Drents Overijsselse Delta & TAUW (2021)

57 Waterschap Vallei & Veluwe, praktijkonderzoek rwzi Soest (lopend)

58 Hoogheemraadschap van Schieland en de Krimpenerwaard (2020 – 2021)

5

CONCLUSIES EN ADVIES

5.1 CONCLUSIES

Lachgasemissie uit rwzi's staat al op de publieke agenda sinds 1997. In de afgelopen 20 jaar is er veel onderzocht en ook de afgelopen drie jaar is er door het CoP veel werk verzet. In dit rapport zijn de ervaringen en opgedane kennis samengevat. Dit met als doel om de waterschappen handvatten te geven over hoe de mate van lachgasemissie is in te schatten, hoe deze te meten en richting te geven aan de reductie van lachgas. De belangrijkste conclusies zijn hieronder opgenomen.

Inschatten van de emissie (hoofdstuk twee)

- Aan de hand van de jaargemiddelde effluentconcentraties ammonium en nitriet is het risico op de vorming en emissie goed in te schatten met het simpele risicomodel dat in 2019 is opgesteld.
- Met de data die in de laatste drie jaar door de waterschappen en andere uit het CoP zijn verzameld is het model uit 2019 geüpdatet en kunnen zuiveringen ingedeeld worden in laag en hoog risico zuiveringen. Een zuivering heeft een hoog risico op lachgasvorming en emissie als de jaargemiddelde nitrietconcentratie in het effluent groter dan 0,25 mg N/l is. De daarbij vastgestelde emissiefactor bedraagt 1,5%. Voor laag risico zuivering is een emissiefactor van 0,5% vastgesteld. Deze emissiefactoren kunnen alleen gebruikt worden om inventarisatie te maken van alle zuiveringen in een beheergebied, voor het werkelijk bepalen van de emissiefactor zijn **altijd metingen** noodzakelijk.

Metten van de emissie (hoofdstuk drie)

In de zuivering kunnen meerdere microbiologische processen gelijktijdig tot lachgasvorming leiden. Dit maakt het kalibreren van (statische/dynamische) modellen in de praktijk lastig. Om consequent en op robuuste wijze gegevens te verzamelen over de lachgasvorming, heeft op dit moment een directe meting daarom de voorkeur. De belangrijkste punten bij het meten van lachgas zijn:

- Het meten van de lachgasconcentratie in de afgezogen lucht van een afgedekte zuivering geeft de meest betrouwbare waarde voor de emissie van lachgas vanuit een zuivering. Wel geeft dit type meting minder inzicht in de oorzaken van de emissie en zijn het merendeel van de zuiveringen in Nederland niet afgedekt.
- In Nederland wordt het meten van lachgas in de vloeistoffase het meest toegepast. De gemeten concentratie kan met een empirische formule worden omgezet naar een emissie. Naast deze vloeistofmeting kan ook de emissie van lachgas gemeten worden via een drijvende box op het oppervlak van een beluchte zone van een zuivering.
- Om tot een betrouwbare emissie van lachgas van een zuivering te komen is een jaarlang meten noodzakelijk om ook de variaties tussen de seizoenen goed mee te nemen.
- Voor het meten van lachgas met de sensoren in de vloeistoffase zijn in ieder geval altijd twee sensoren nodig. De eerste sensor dient altijd geplaatst te worden aan het eind van een anoxische zone om mogelijke vorming van lachgas tijdens de denitrificatie vast te stellen. De tweede sensor dient in de belangrijkste beluchtingszone (zone waarin beluchting altijd aan staat) geplaatst worden. De meest geschikte locatie dient in de praktijk

eerst bepaald te worden door de sensor over een periode van vier weken op verschillende locaties te plaatsen in de beluchte zone.

- De werking van de sensor wordt door de leverancier voor vier maanden gegarandeerd, maar kan voor een langere periode goed functioneren. Voor het goed functioneren is het van belang om de sensor regelmatig schoon te houden en te kalibreren.
- De gemeten concentraties in de vloeistoffase kunnen op drie verschillende manieren worden omgerekend en verwerkt:
- via de bijgeleverde controller van de leverancier van de sensoren en de resultaten op te nemen in bijvoorbeeld Historian of Z-info.
- de omrekening naar emissie zelf te programmeren en deze op te nemen in bijvoorbeeld Historian of Z-info.
- offline de omrekening uit te voeren via een Excel bestand; deze methode is geschikt voor de korte termijn, maar voor de langere termijn kan beter gebruik gemaakt worden van een automatische verwerking.

Reductie van lachgas (hoofdstuk vier)

In de afgelopen 20 jaar is er zowel in de praktijk als op de universiteiten veel onderzoek gedaan naar de emissie van lachgas en hoe deze te reduceren. De belangrijkste lessen zijn:

- de aanwezigheid van nitriet de vorming en emissie van lachgas bevordert; nitriet kan ontstaan door een tekort aan zuurstof en/of een te hoge ammoniumbelasting, het voorkomen hiervan en/of het regelen via een goede procesregeling kan bijdragen aan het reduceren van de emissie.
- voldoende denitrificatiecapaciteit kan bijdragen aan het verlagen van de lachgasemissie; dit kan bereikt worden door te streven naar een goede CZV/N ratio, zo min mogelijk zuurstof terugvoeren via de recirculatie of gewoon voldoende fysieke ruimte hebben;
- zorg te dragen voor een goede proces/beluchtingsregeling zodat niet te veel en niet te weinig zuurstof wordt ingebracht en niet te veel zuurstof wordt teruggevoerd naar de anoxische ruimtes waar remming van de denitrificatie en/of gebrek aan voldoende denitrificatiecapaciteit de emissie van lachgas kan bevorderen
- Tot slot is het vooral zinvol te kijken naar reductiemaatregelen voor de emissie. Op termijn kunnen ook 'end-of-pipe' oplossingen waarbij het gevormde lachgas wordt omgezet een rol gaan spelen, maar momenteel zijn daar nog geen (economisch) haalbare methoden voor.

5.2 ADVIES

In de afgelopen 20 jaar is er in Nederland en daarbuiten al heel veel kennis gedaan over de vorming en de emissie van lachgas en neemt de aandacht zeker ook wereldwijd sterk toe. Op dit moment wordt er door de waterschappen gewerkt aan een versnellingsprogramma 'Lachgas', voor het onderzoek dat hierin zal plaatsvinden wordt het volgende geadviseerd:

Inschatten van de emissie

- Meer data te verzamelen om het eenvoudige risicomodel verder te verfijnen en daar waar nodig aan te passen.
- Te onderzoeken of er nog andere procesparameters een goede voorspelling geven voor de mate van lachgasemissie en deze dan mogelijk op te nemen in een meer gedetailleerd model waardoor een meer gedifferentieerd (en nauwkeuriger) beeld ontstaat van de totale lachgasemissies vanuit zuiveringen in Nederland.
- Voor bovenstaande de al verzamelde data van de afgelopen één tot vijf jaar in te zetten.

Metten van de emissie en andere metingen

- Te onderzoeken of andere meetmethoden dan de meting in de vloeistoffase beschikbaar zijn en een betrouwbaar resultaat voor de lachgasemissie opleveren.
- De al verzamelde en nog te verzamelen data centraal te verwerken en te visualiseren zodat een gezamenlijk analyse kan plaatsvinden en inzicht verkregen kan worden in hoe de emissie te voorspellen en hoe deze te reduceren.
- Een representatieve set zuiveringen te selecteren die inzicht kunnen geven in hoe de lachgasemissie (beter) is te voorspellen, en op welke wijze en in welke mate de emissie van lachgas gereduceerd kan worden.
- De concentraties nitriet in de beluchtingstank (en mogelijk ook het effluent) continu te monitoren zodat de rol van nitriet bij de vorming van lachgas beter begrepen kan worden;
- voor het meten van nitriet zijn diverse meetmethodes beschikbaar die nu al op een aantal zuiveringen worden onderzocht.
- De emissie van lachgas uit stikstofdeelstroombehandelingen ook mee te nemen.

Reductie van lachgas

Uit het praktijkonderzoek in Nederland en de wetenschappelijke literatuur komen duidelijk drie oplossingsrichtingen naar voren die de emissie van lachgas kunnen reduceren:

- Het voorkomen van hoge ammoniumpieken (hoge N-slibbelasting);
- Het optimaliseren van de procesregelingen;
- Voldoende ruimte te geven aan de denitrificatie.
- Bovenstaande oplossingsrichtingen komen erop neer dat gestreefd wordt naar een lage N_{tot} in het effluent voor een lage lachgasemissie.

Vanuit deze oplossingsrichtingen wordt geadviseerd de volgende onderzoeksvragen mee te nemen in een vervolgonderzoek:

- Hoe dienen de maatregelen er concreet uit te zien (procesinstellingen) om de emissie van lachgas te reduceren?
- Welke reductie van lachgas is mogelijk en van welke parameters is deze afhankelijk?
- Binnen welke grenzen van een bestaande zuivering is via processturing verlaging van de emissie mogelijk?
- Wat zijn de ontwerpparameters en de waarden daarvan voor een zuivering met minimale emissie?

BIJLAGE A1

ENQUÊTE

INVENTARISATIE ERVARINGEN N₂O-SENSOREN UNISENSE

Ingevuld door Maxime van Wiggen (HDSR), Nick Ivens (HHSK), Amor Gaillard (WDOD), Frank van Grootveen (WSVV) en Floris de Heer (WSAM).

Gebruik N₂O-sensoren

Gebruikt u N₂O-sensoren van Unisense? Hoeveel gebruikt u er?

Iedereen: Ja, sensoren van Unisense.

Waterschap	Aantal sensoren
De Stichtse Rijnlanden (HDSR)	2
Schieland en Krimpenerwaard (HHSK)	4
Drents Overijsselse Delta (WDOD)	2
Vallei en Veluwe (WSVV)	2
Aa en Maas (WSAM)	2

Welke sensorkop gebruikt u, de standaard (0 tot 1,5 mg/L) of de low range variant (0 tot 0,56 mg/L)?

Iedereen: Standaard.

Hoeveel gebruikservaring heeft u met deze sensoren? Hoe lang heeft u ze al? Hoeveel aandacht gaat er maar uit?

Waterschap	Antwoord
HDSR	We gebruiken de sensoren nu een ruim jaar. Elke week dienen de sensoren even schoon gemaakt te worden, en elke twee maanden worden ze gekalibreerd. Verder weinig omkijken naar.
HHSK	Wij hebben ze nu meer dan een jaar en doen zelf het onderhoud, dit gaat goed.
WDOD	Ze zijn sinds april 2020 in gebruik en op 1-12-20 is de 1e keer de sensorhead vervangen. Er gaat weinig aandacht naar uit. Schoonmaak en kalibratie (door beheerder) verloopt goed.
WSVV	De sensoren hangen er ongeveer een half jaar. Worden eens in de 1 à 2 weken geïnspecteerd, schoon-gemaakt en eventueel gekalibreerd.
WSAM	Wij hebben de sensoren sinds maart 2020, dus inmiddels iets langer dan een jaar. We zijn er veel mee bezig en weten inmiddels aardig goed hoe ze te onderhouden en kalibreren.

Voldoen de N₂O-sensoren aan de verwachtingen die u ervan had?

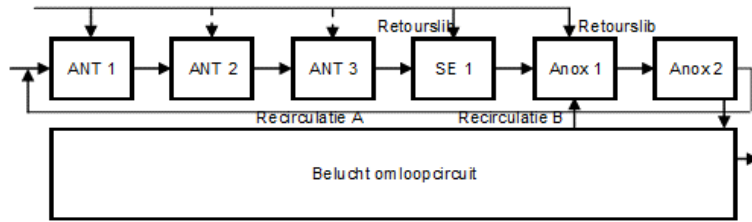
Waterschap	Antwoord
HDSR	In principe wel, maar de N ₂ O is doorgaans zo laag dat we niet echt 'gevoel' bij bepaalde waarden of omstandigheden hebben kunnen ontwikkelen. De hoop is dat er wat duidelijker signalen gemeten worden op de volgende locatie.
HHSK	De verwachtingen waren hoger, maar helaas blijft dit nog de enige reële oplossing.
WDOD	In principe wel, maar na de 1e vervanging van de sensorhead, loopt de anoxische sensor uit de pas. Het lag niet aan de kalibratie. Soms geeft de anoxische sensor nu extreme (ongeloofwaardige) pieken van 10 mg/L (maximale meetwaarde). Terwijl deze met de vorige sensorhead max 0,5 mg/L was. De aerobe sensor heeft geen problemen. Ik heb de anoxische sensor niet teruggestuurd naar Unisense, of ze hierover gecontacteerd. Ik dacht namelijk lange tijd dat de kalibratie gewoon niet goed was gegaan en dat het aan ons lag. Ondertussen is er zoveel tijd verlopen, dat terugsturen toch geen zin meer heeft. Binnenkort worden de sensoren beide weer standaard preventief vervangen.
WSVV	Ja tot zover wel.
WSAM	We hadden gedacht dat het iets makkelijker zou gaan.

Locaties en meetbereik N₂O-metingen

Op welke rwzi's gebruikt u de Unisense N₂O-sensoren? En wat is de procesconfiguratie (bv carousel, mUCT...) en het type beluchting (bv belenbeluchting, puntbeluchting) van de rwzi's in kwestie?

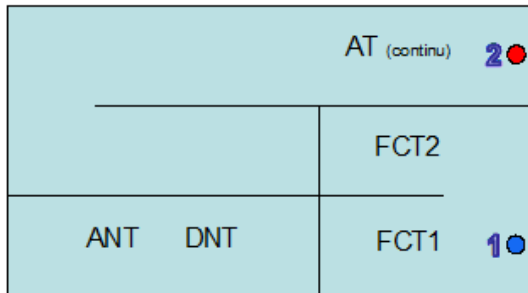
Waterschap	Antwoord
HDSR	Rwzi Zeist: propstroomtank UCT.
HHSK	Awzi Kralingseveer (voorbezinktank -> denitrificatie tank en nitrificatietank die naar elkaar recirculeren -> carousel -> nabezinktank), wordt door TAUW ook Hoogvliet configuratie genoemd.
WDDO	Op rwzi Zwolle in de aerobe en anoxische zone van straat 3 (Zwolle heeft 5 aparte straten). De procesconfiguratie is: anaeroob-selector- anox-aeroob. Er wordt gebruik gemaakt van belenbeluchting.

Procesconfiguratie rwzi Zwolle (WDDO):

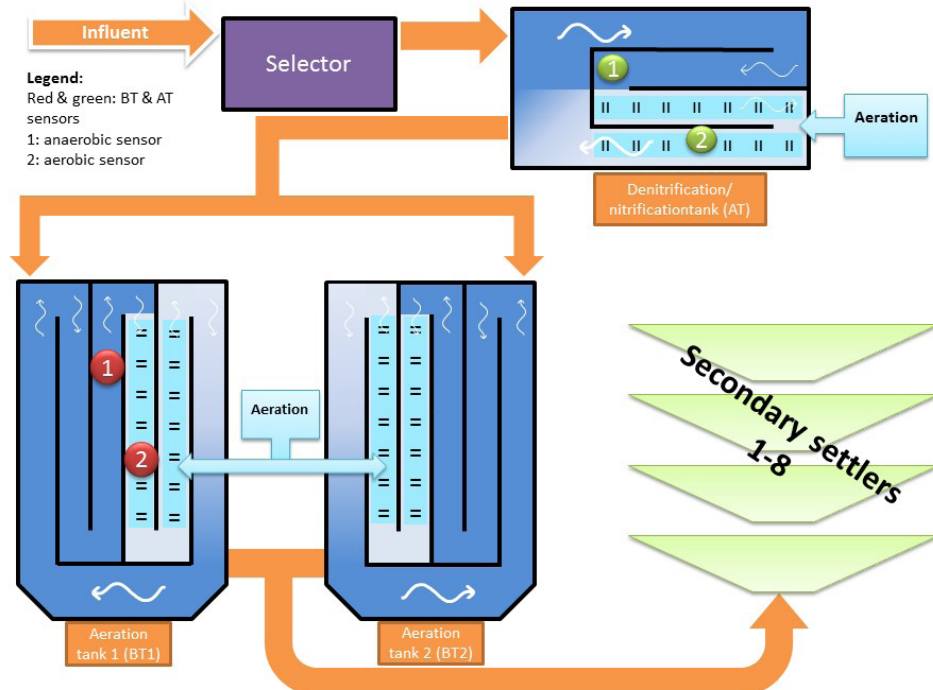


Op welke precieze locaties in de rwzi meet u lachgas (specificeer zoveel mogelijk)? Als u een bovenaanzicht van de locaties heeft, die alstublieft invoegen.

HDSR:



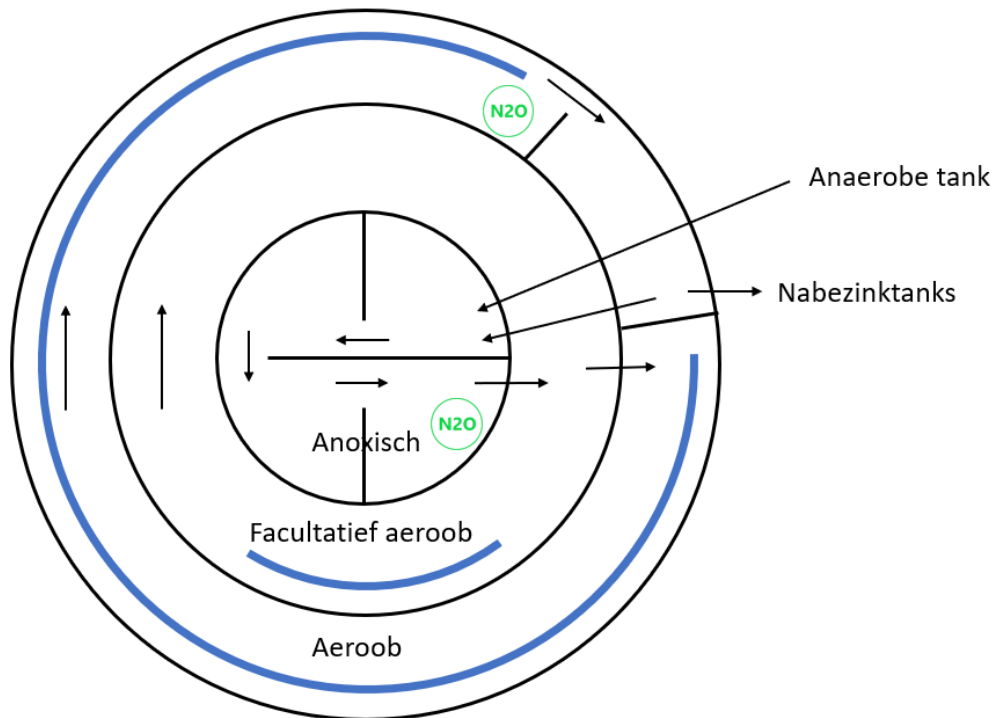
HHSK:



WSVV:



WSAM:



Hoe bent u ertoe gekomen juist op deze plaatsen lachgas te meten?

Waterschap	Antwoord
HDSR	Zo goed mogelijk adviezen uit de Unisense handleiding opgevolgd.
HHSK	In overleg met Unisense en eigen experimenten.
WDOD	Op basis van gedeelde ervaringen in COP N ₂ O.
WSV	Tussen de 2 beluchters, net voor de 2de, zodat er flinke activiteit in het actief slib plaats vindt, en toch enigszins gestabiliseerd.
WSAM	Advies van Unisense. We verplaatsen de sensoren wel zo nu en dan voor het bepalen van profielen in de aerobe en anoxische zone, en om te bepalen hoeveel lachgas wordt gevormd in de facultatief aerobe zone (met name de anoxische zone die op de beluchting volgt).

Wat is het bereik (mg/L N₂O-N) van de meetwaarden op elk van die locaties?

Waterschap	Antwoord
HDSR	0 tot 1,5 mg/L.
HHSK	Vaak tussen de 0 en 0.5 mg/L.
WDOD	Einde aerob: 0-3,5 mg/l
Einde anox: 0 - 1,7 mg/l.	

Problemen met N₂O-sensoren

Extreem hoge waarden in beluchte zone: Bij het plaatsen van een N₂O-sensor in een beluchte zone kan het voorkomen dat de sensor hele hoge waarden gaat meten (bij onszelf: >15 mg/L). Volgens Unisense is dit het gevolg van de aanwezigheid van een microscopisch klein belletje in de sensortip, waardoor er zuurstof in de meetkamer van de sensor kan komen.

Heeft u wel eens zoiets meegemaakt?

Waterschap	Antwoord
HDSR	Nee. Het grootste probleem bij ons is heel lage waarden.
HHSK	Nee. Wij hebben wel sensoren in de beluchte zones hangen.
WDOD	Nee, niet in de beluchte zone. Wel in de anoxische. Die geeft soms extreme pieken. Het zet me wel te denken hoe ik het op kan laten lossen. Ik heb er tot nog toe niet veel werk van gemaakt.
WSV	Nee, scheelt waarschijnlijk dat we net voor de beluchter meten, en de puntbeluchters geven relatief grove bellen, scheelt misschien ook nog wat.
WSAM	Ja dus ??

Heeft u daarna de sensor weer werkzaam kunnen krijgen? Hoe?

Waterschap	Antwoord
HHSK	Als we storing hadden is dat uiteindelijk gerepareerd door het terug te sturen naar Unisense.
WDOD	Probleem is niet opgelost. De sensor in anoxische zone geeft nog steeds soms enorme pieken.
WSAM	We kregen de tip van Unisense om water te ontgassen door het 10 minuten lang te laten koken. Na afkoelen moesten we de sensor toen in het water houden, zodat het microscopisch kleine belletje eruit zou kunnen diffunderen. Dit had echter niet het gewenste effect. Uiteindelijk hebben we een nieuwe sensorkop erop gezet.

Heeft u een idee hoe dit probleem voorkomen kan worden? Waar let u zelf goed op bij het installeren of verplaatsen van een sensor wat met dit probleem te maken kan hebben?

Waterschap	Antwoord
HDSR	Het belletje zou in theorie verholpen kunnen worden door de meetsensor (voorzichtig) een aantal keer goed te schudden (zoals een ketchupfles). Dit werd ons geadviseerd, maar bij ons bood het geen soelaas omdat een belletje dus niet het probleem was.
HHSK	NVT, mogelijk vaker kalibreren?
WDOD	Ik zal het met de beheerder bespreken dat inkapseling van een luchtbel mogelijk het probleem kan zijn. Maar de sensor zweeft aan een kabel in het slib. Er is daardoor wel turbulentie zou ik zeggen die dan soms wel en soms niet een luchtbel in de sensortip laat komen...
WSAM	Geen idee.

Correctie voor negatieve meetdata/ verschuiving baseline

Een N₂O-sensor kan op een gegeven moment negatieve waarden gaan meten. Het gaat om slechts enigszins negatieve waarden (bij ons -0,005 tot -0,02 mg/L N₂O-N). Volgens Unisense komt dit door een verbeterde werking van de 'oxygen guard'⁵⁹ over de tijd, en kan het worden opgelost door een nul-kalibratie. Maar hiermee is de fout van de reeds gelogde data uiteraard niet opgelost. Er zal een correctie moeten worden toegepast om toch gebruik te kunnen maken van de reeds gelogde data.

Heeft u wel eens negatieve waarden gemeten?

Waterschap	Antwoord
HDSR	Ja.
HHSK	Regelmatig lichte negatieve waardes.
WDOD	Nee, nooit.
WSV	Ja, zij het inderdaad zeer beperkt tot maximaal enkele honderdsten.

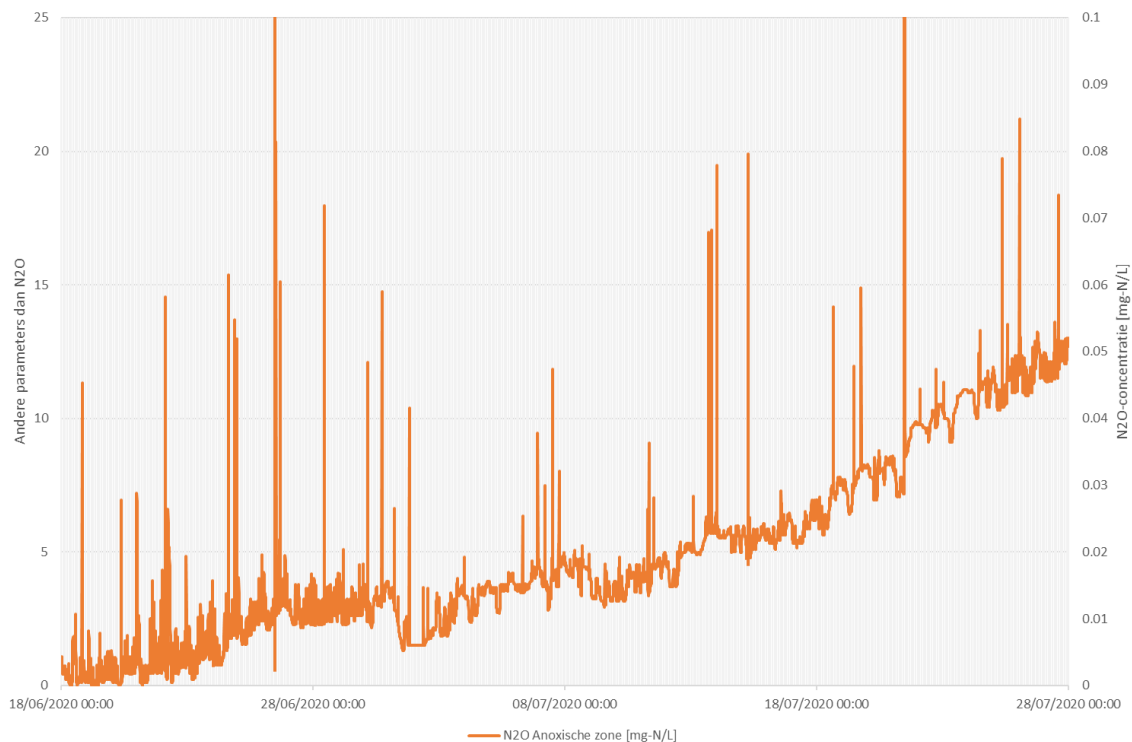
Wat heeft u gedaan om voor de negatieve meetwaarden te corrigeren?

Waterschap	Antwoord
HDSR	Nog geen actie op ondernomen. Wordt vooralsnog vooral beschouwd als collateral damage (schade per ongeluk).
HHSK	De waardes op 0 afgerond.
WSV	Kalibratie uitvoeren. Voor reeds gegenereerde meetwaarden is er weinig meer aan te doen, dit zie ik over het algemeen als '0': (je kunt je ook afvragen hoe nauwkeurig je kunt/wilt meten).
WSAM	Bij alle waarden de meest negatieve waarde optellen.

⁵⁹ De 'oxygen guard' is het onderdeel van de sensor dat O₂ ervan moet weerhouden de meetkamer in te komen.

De baseline kan – in plaats van naar een negatieve waarde – ook naar een positieve waarde verschuiven. Zie onderstaande grafiek.

FIGUUR 5.2 WAARGENOMEN DRIFT BIJ EEN N₂O METING (WATERSCHAP AA EN MAAS)



Herkent u dit probleem?

Waterschap	Antwoord
HDSR	Nee
HHSK	We hebben 1 keer gehad dat de sensor constant te hoge waardes mat, maar toen schoot het omhoog.
WDOD	Nee, maar wellicht is me deze verschuiving nooit opgevallen, omdat het in Zwolle slechts een zeer relatief kleine verschuiving zou zijn omdat we altijd vrij hoge waarden meten tussen 0 en 3 mg/L.
WSVV	Ik heb nog (te) beperkt data bekeken (sensoren zijn nog niet zo lang online uitleesbaar) om dit te herkennen.

Wat heeft u gedaan om de data hiervoor te corrigeren?

Waterschap	Antwoord
HDSR	Ik heb er geen ervaring mee, maar opnieuw kalibreren lijkt me aan het plaatje te zien slim...
HHSK	Na overleg hebben we deze ter reparatie gestuurd en bleek deze inderdaad defect te zijn.
WSAM	Sensor kalibreren om probleem op te lossen. Voor reeds gegenereerde data niet gecorrigeerd. Voor het zien van verbanden enkel plaatselijk relatief kijken ('onder deze condities is er een piek').

Andere problemen

Kwamen bovenstaande problemen overeen met problemen die u wel hebt gehad met de N₂O-sensoren?

Waterschap	Antwoord
HHSK	Lichtelijk.
WDOD	Enkel de ervaring met abnormale extreme uitschieters zo nu en dan in 1 sensor.
WSVV	Komt deels bekend voor, heb het nog niet zozeer als een probleem ervaren.

Heeft u nog andere problemen ondervonden met de N₂O-sensoren dan bovenstaande? Als dat het geval is: Wat is het probleem? Heeft u daar al een oplossing op gevonden?

Waterschap	Antwoord
HDSR	Wij hebben een tijd lang een soort haaiantandenpatroon gemeten. Dit bleek te maken te hebben de manier waarop we data loggen (delta retrieval). Dit hebben we aangepast naar cyclisch (elke minuut) loggen.
HHSK	Dat de sensor heel erg negatieve waardes bleef meten, zelfs na kalibratie, toen bleek deze beschadigd te zijn in de tip.
WDOD	Nee.
WSV	Nee.

Gebruik van alternatieve methodes voor bepalen N₂O-concentratie/emissie

Naast het gebruik van de N₂O-sensor voor in de vloeistoffase, is het ook mogelijk N₂O te meten in de gasfase m.b.v. een kap boven het water of door gebruik te maken van een overdekte AT. Daarnaast is de N₂O-emissie in te schatten d.m.v. de risico-inschatting op basis van de concentraties ammonium en nitriet in het effluent (zie STOWA-rapport 2019-05).

Zo u wel gebruik hebt gemaakt van een N₂O-sensor voor in de gasfase, wat zijn uw ervaringen op het gebied van onderhoudsgemak en betrouwbaarheid van de meetdata?

Waterschap	Antwoord
HHSK	Terug in 2012 is op die wijze gemeten op Kralingseveer dit leverde erg betrouwbare resultaten. Wel dure en onderhoud intensieve methode.
WSAM	Lang geleden door iemand anders van WSAM gebruikt. Data ziet er goed uit. Ik weet niet of het meer onderhoud vereist dan de sensoren voor in waterfase.

Zo u gebruik heeft gemaakt van de risico-inschatting van de STOWA: in hoeverre kwam de geschatte N₂O-emissie overeen met een anderszins bepaalde N₂O-emissie (bijv. formules Unisense of sensor in gasfase)?

Waterschap	Antwoord
HDSR	Nog geen vergelijking gemaakt. Bij mijn weten is het STOWA model alleen bruikbaar om het risico op lachgasemissie van een rwzi vast te stellen, niet om uitspraken te doen over daadwerkelijke emissiegetallen, maar ik weet niet of dit klopt.
HHSK	De risico inschatting hanteert een vrij grote error-marge, deze kwam daardoor wel overeen met wat Unisense meet.
WDOD	Ik kan de emissie naar de lucht niet echt bepalen omdat we geen luchtdebiet meten per straat afzonderlijk. Maar als ik de gemeten daggemiddelde N ₂ O concentratie (aan einde beluchte zone, ofwel "effluent" 0,4 mg/l N ₂ O-N) relateer aan de ingaande Nkj concentratie (73 mg/l Nkj), dan kom ik op ongeveer 0,55 % van de ingaande Nkj die is omgezet naar N ₂ O. Ik weet echter niet goed of mijn benadering een goede methode is. Uitgaande van de piekconcentratie overdag (1,5 mg/l N ₂ O-N) gaat het om 2% van de ingaande Nkj. En de STOWA methodiek zou zeggen dat het gemiddeld 3% is (hoog risico).
WSV	Nvt.
WSAM	Nee, nog niet gedaan...

Kent u nog andere methoden dan bovenstaande om de N₂O-emissie te meten of te schatten? Wat zijn uw ervaringen hiermee?

Waterschap	Antwoord
HDSR	Model van stagiair Wetterskip: monnikenwerk maar wel een bruikbare tool. Verder kan de IPCC emissiefactor gebruikt worden.
HHSK	De methode die het IPCC aanhoudt is erg grof, maar wel officieel nu. Dus ook al klopt deze niet we monitoren hier wel al mee.

Validatie meetwaarden

Het is goed om regelmatig de meetwaarden van de N₂O-sensoren te valideren, bijv. door de berekende N₂O-emissie (gebaseerd op gemeten concentraties) te vergelijken met de uitkomsten van de risico-inschatting van de STOWA of door tijdelijk twee N₂O-sensoren naast elkaar te plaatsen (om na te gaan of meetwaarden overeenkomen).

Twijfelt u wel eens aan de meetresultaten? Waar zijn die twijfels op gebaseerd?

Waterschap	Antwoord
HDSR	Heel lage meetwaarden.
HHSK	Heel erg hoge of meerdere dagen 0 twijfel ik aan.
WDOD	Ik twijfel enkel aan de meetwaarden bij de hoge extreme uitschieters, zoals genoemd in paragraaf 3.1. Deze waarden negeer ik.
WSV	(nog) niet, meetperiode is nog te kort.
WSAM	Hele lage meetwaarden. Soms ligt de concentratie lange tijd op 0, en komen er af en toe pieken tussendoor. Merkwaardig.

Valideert u de meetdata van de N₂O-sensoren? Zo ja, welke methode gebruikt u daartoe?

Waterschap	Antwoord
HDSR	Nog niet eerder gedaan.
HHSK	We kunnen ze helaas niet echt valideren.
WDOD	Enkel vergelijking met STOWA risico inschatting.
WSV	We meten 2 beluchtingscircuits tegelijk. Eerst een aantal maanden inderdaad als een soort validatie vooraf, daarna gaan we instellingen per circuit wijzigen, dan wordt valideren t.o.v. de andere straat lastiger.
WSAM	Als ik twijfel aan de meetdata, plaats ik de sensoren een dag lang naast elkaar.

Met welke frequentie doet u dat?

Waterschap	Antwoord
HHSK	Ik controleer de data ong. 1x per maand.
WDOD	1x per jaar.
WSV	Nvt.
WSAM	Op het moment dat ik twijfel aan de meetdata.

Kent u nog een andere methode voor validatie dan hierboven beschreven?

Waterschap	Antwoord
HDSR	Nee.
HHSK	Helaas niet.
WDOD	Vergelijking van de recente meetwaarden met voorgaande meetwaarden, na een sensorhead vervanging of kalibratie. Ter controle.
WSV	Nee.
WSAM	Nee.

Uitvoering onderhoud N₂O-sensoren

Wie doet bij u het onderhoud van de N₂O-sensoren, doet u dat zelf of laat u het doen door een procesoperator of iemand anders? Varieert het bij u wie het onderhoud uitvoert of is het steeds dezelfde persoon?

Waterschap	Antwoord
HDSR	Kalibreren doe ik zelf, het wekelijks schoonspoelen van de sensoren wordt gedaan door de beheerder van de rwzi.
HHSK	Wij hebben 1 vaste procesoperator die zich bezighoudt met de lachgassensoren als dit nodig is, hij doet ook al het onderhoud.
WDOD	Dat doet de beheerder altijd.
WSV	Zuiveringsbeheerder checkt visueel en maakt schoon, kalibratie doe ik doorgaans zelf (procestechnoloog).
WSAM	Vervangen sensorkoppen en kalibreren doe ik zelf.

Met welke frequentie wordt de kalibratie (meestal) uitgevoerd?

Waterschap	Antwoord
HDSR	Elke twee maanden.
HHSK	Eens per twee maanden.
WDOD	1x per 3 maanden schat ik.
WSV	Zeker maandelijks, afhankelijk van temperatuurwisselingen of enige twijfel bij het meetsignaal vaker.
WSAM	Eens in twee maanden. In de praktijk (met moeilijkheden) eigenlijk wel vaker, gemiddeld ongeveer eens in de maand.

Hoelang duurt het uitvoeren van een kalibratie ongeveer?

Waterschap	Antwoord
HDSR	30 minuten, maar ik trek er een uur voor uit.
HHSK	Één of twee uur.
WDOD	Max 30 min.
WSV	Ongeveer half uurtje voor 2 sensoren (inclusief demonteren, schoonmaak, etc).
WSAM	Haluur tot uur voor beide sensoren.

Met welke frequentie worden de sensorkoppen vervangen?

Waterschap	Antwoord
HDSR	Elke zes maanden.
HHSK	Eens per 6 maanden.
WDOD	Na 8 maanden was de eerste keer. De volgende keer zal ook > 6 maanden worden. Waarschijnlijk na 7 maanden.
WSV	Afhankelijk van de (ogenschijnlijke) kwaliteit van het meetsignaal
WSAM	Elke zes maanden

Wat zou u ervan vinden als het onderhoud zou worden uitbesteed aan een extern bedrijf (indien hierop gespecialiseerd)?

Waterschap	Antwoord
HDSR	Qua tijdsbesteding vind ik het niet erg om het zelf te doen, maar ik heb soms wel het gevoel dat ik niet goed weet hoe de sensoren zich horen te gedragen en een gespecialiseerd bedrijf weet wellicht beter hoe de meetresultaten 'te lezen'.
HHSK	In mijn optiek onnodig, het werk hieraan is vele malen minder dan dat er wordt besteed aan het schoonhouden van onze andere sensoren en kan makkelijk worden ingepland of meegenomen in het standaard rondje. Als de procesvoerders zouden aangeven dat het teveel werk is dan zou ik daar anders in staan, maar tot nu toe vonden ze het alleen maar interessant en prima te doen. Wel heb ik interesse als Unisense of een ander bedrijf een (Nederlandse) training zou kunnen geven op locatie voor de procesvoerders hoe met de sensoren om te gaan.
WDOD	Lijkt me niet nodig. Ik hoor geen klachten van de beheerder die nu het werk uitvoert.
WSV	Zou ik zeker voor open staan. Wel is het zo dat het bij ons nu vooral onderzoeksgericht is en de sensoren voorlopig tijdelijk zijn (gehuurd), dus nog niet direct van toepassing.
WSAM	Met de uitbreidingen die wij willen doen, lijkt mij dat erg handig. Ik kan dat niet zelf blijven doen, en de operators zijn al erg druk.

BIJLAGE A2

BEREKENING N₂O EMISSIE RWZI MET BELLENBELUCHTING

1. Onderstaande formules worden in het BBS geprogrammeerd van waaruit Z-info wordt gevoed.
2. Het verschilt hoe de data worden opgeslagen totdat het aan Z-info gevoed wordt. Zorg ervoor dat de data die gebruikt wordt met dezelfde tussenpozen gemeten is, zodat de berekende waarden ook over vergelijkbare tussenpozen berekend worden voordat deze aan Z-info gevoed worden.
3. De meeste systemen gebruiken delta storage om hun data binnen Historian te loggen. Belangrijk is om na te gaan op welk punt de data naar Z-info gaat.
 - a. Als er aan Z-info gerapporteerd wordt voordat de data als Delta storage wordt opgeslagen: Met realtime data kan ook realtime de emissie berekend worden. Het gemiddelde van deze berekende waarde aan het eind van een dag geeft de uitstoot in g/m³/d. Dit kan aan Z-info gerapporteerd worden per dag.
 - b. Als uw systeem gebruik maakt van delta storage en daarvanuit naar Z-info logt: Een waarde wordt alleen gemeten en berekend als deze verandert. Hiermee kunt u het risico lopen dat een gemiddelde waarde in Z-info veel te hoog of te laag gerapporteerd wordt. Het advies is dan om uw data storage op cyclic in te stellen. Dan wordt er om een vastgestelde tijdseenheid de op dat punt gemeten waarde gebruikt voor de berekening. Het gemiddelde van deze waarden geeft dan een uitstoot in g/m³/d die aan Z-info gerapporteerd kan worden.
4. Het is ook mogelijk om het BBS alleen de gemiddelde concentratie te laten rapporteren en dan de berekening in Z-info te doen. Zorg dat de andere variabelen wel goed omgerekend worden. Het luchtdebiet heb is in m³/s gemiddeld over de dag nodig en later in totale m³/d luchtinbreng. Ook de temperatuur wordt gebruikt en moet goed opgeslagen zijn.
5. Uit de formules van Unisense komt een formule rollen waarvan de eenheid g/m³/d is. Deze waarde moet dus nog vermenigvuldigd worden met het volume van de tank in m³ waaruit de emissie plaatsvindt. Het getal is vaak vrij groot, dus door het nog door 1000 te delen krijgt men een behapbaar getal in kg/d.

Deze formules zijn afkomstig uit de handleiding voor de Unisense sensoren.

Emissie naar de lucht berekend aan de hand van de volgende formules;

Er worden hier voorbeeld waarden gebruikt van RWZI Zeist

$$Vg = \frac{Qa(m^3/s)}{Opp.AT(m^2)} = \frac{2500m^3/h/3600}{600m^2} = 0.00157 m/s \quad (1.1)$$

Oppervlakte AT RWZI Zeist is 600 m².

Omdat formule 1.1 binnen het BBS (SCADA) wordt berekend kan hier voor Qa het gemeten luchtdebiet op dat moment worden ingevuld. Eventueel kan met behulp van klepstanden of vermogensopname van een blower een berekende waarde worden gebruikt.

Voorbeeld 2500 m³/h.

$$k_1 a_{N_2O, 20^\circ C} = \left\{ \frac{D_r}{D_l} \right\}^{-0.49} * 34500 * V_g^{0.86} \quad (1.2)$$

D_r = diepte AT (m) RWZI Zeist = 4

D_l = diepte gerelateerd aan lab meting en is een constante van 0,815 m.

Alleen V_g is variabel.

$$k_1 a_{N_2O, 20^\circ C} = 15823 * V_g^{0.86} = 15823 * 0,00157^{0.86} = 47,192 d^{-1} \quad (1.3)$$

$T_{process}$ is een variabele die gemeten moet worden.

Voorbeeld 20,2°C

$$k_1 a_{N_2O, T_{process}} = k_1 a_{N_2O, 20^\circ C} * 1.024^{(T_{process} - 20^\circ C)} = 47,192 * 1,024^{(20,2^\circ C - 20^\circ C)} = 47,4 d^{-1} \quad (1.4)$$

$$k_H = k_H^\theta * e^{\left(\frac{-AsolnH}{R} * \left(\frac{1}{T_{process} + 273,15} - \frac{1}{T^\theta + 273,15} \right) \right)} \quad (4.2)$$

k_H^θ is een constante van 0,0247 mol/L/bar

$\frac{-AsolnH}{R}$ is een constante van 2675 K

T^θ is een constante van 25°C

$T_{process}$ is een gemeten variabele

$$k_H = 0,0247 * e^{\left(2675 * \left(\frac{1}{20,2 + 273,15} - 0,00335 \right) \right)} = 0,0286 \text{ mol/L/bar}$$

$$H_{N_2O, T_{process}} = \frac{1}{k_H * R * (T_{process} + 273,15) * 10^3} = \frac{1}{0,0286 * 8,314 * 10^{-5} * (T_{process} + 273,15) * 10^3}$$

$$= \frac{1}{0,0286 * 8,314 * 10^{-5} * (20,2 + 273,15) * 10^3} = 1,43 \quad (4.1)$$

R is een constante 8,314*10⁻⁵

$T_{process}$ en k_H zijn variabel, zie de formules en toelichting voorafgaand.

Emissie N₂O per volume voor de beluchte zone:

$$Y_{N_2O, T_{process}} = H_{N_2O, T_{process}} * S_{N_2O} * \left(1 - e^{-\frac{k_1 a_{N_2O, T_{process}} * V_R}{H_{N_2O, T_{process}} * Q_A}} \right) * \frac{Q_A}{V_R} \quad (2)$$

is de werkelijk gemeten lachgas concentratie door de sensor in de beluchte zone. Voorbeeld: 0.00469 g/m³

$H_{(N_2O, T_{process})}$ en $k_{la_{(N_2O, T_{process})}}$ komen uit de eerder genoemde formules

Bij Q_A wordt opgegeven om dit in m³/d te leveren. Als men dit in m³/d invult dan wordt de uiteindelijke uitstoot ook in g/m³/d. het gemiddelde is dan de uitstoot over de totale 24 uur.

Men kan ook het debiet hier in m³/h invullen om een uitstoot in g/m³/h te verkrijgen.

V_R is het volume van je tank. In dit geval alleen het beluchte gedeelte van de tank.

$$Y_{N_2O, T_{proces}} = 1,433 * 0,00469 * \left(1 - e^{-\frac{47,4 * 2500}{1,433 * 2500 * 24}} \right) * \frac{2500 * 24}{2400} = \frac{0,00672077 * (1 - 0,2671) * 2500 * 24}{2400} = 0,12315 \text{ g/m}^3/\text{d}$$

Emissie N_2O per volume voor de onbeluchte zone:

$$Y_{N_2O, T_{proces}} = k_{L_{a_{N_2O, T_{proces}}}}^{non-aerated} * \left(S_{N_2O} - \frac{C_{N_2O, air}}{H_{N_2O, T_{proces}}} \right) = 3 * \left(0,0046 - \frac{0,0003}{1,433} \right) = 0,013171 \text{ g/m}^3/\text{d} \quad (3)$$

S_{N_2O} is de werkelijk gemeten lachgas concentratie door de sensor in de onbeluchte zone.

Voorbeeld: 0.0046 g/m³

$k_{L_{a_{N_2O, T_{proces}}}}^{non-aerated}$ is een constante tussen de 2 en 4 d⁻¹, hier wordt gemiddeld 3 d⁻¹ aangehouden.

$S_{N_2O, air}$ is een constante 0,0003

BIJLAGE A3

BEREKENING N₂O EMISSIE RWZI MET PUNTBELUCHTING

Om de emissie van lachgas te kunnen berekenen bij een beluchtingstank met puntbeluchters dienen de volgende formules gebruikt te worden:

$$SOTR = P * SAE \quad (1.1)$$

SOTR Standaard Oxygen Transfer Rate (kg O₂/h)
 P Opgenomen vermogen van de in bedrijf zijnde puntbeluchters (kWh)
 SAE Standard Aeration Efficiency (kg O₂/kWh). Hiervoor gebruiken we een vaste waarde van 2 kg O₂/kWh.

$$AOTR = \frac{\alpha * F * SOTR * (B * O_2^{SatT_{proces}} - O_2^{Proces})}{O_2^{Sat20^{\circ}C}} * 1,024^{(T_{proces} - 20^{\circ}C)} \quad (1.5)$$

AOTR Oxygen transfer rate aeration tank (kg O₂/h)
 a Correctie factor voor omrekenen van schoonwater naar vuilwater. In de praktijk voldoet hier een factor 0,9
 F Factor voor puntbeluchters is deze 1
 B Correctie factor voor verzadigingsconcentratie van schoon naar vuil water in de praktijk is dit 0,95
 O₂^{SatT_{proces}} Zuurstof verzadigingsconcentratie (kg O₂/m³). In de voorbeeldberekening is deze waarde bij 22°C gelijk aan 0,00883 kg/m³.

Uit de waarden van O₂^{SatT_{proces}} en O₂^{Sat20°C} is nu een lineaire vergelijking te berekenen met de functie $y = -0,1x + 11,03$ hierbij is x de actuele proces temperatuur.

$$O_2^{SatT_{proces}} = \frac{(-0,1T_{proces} + 11,03)}{1000}$$

O₂^{Proces} Zuurstof concentratie in de AT (kg O₂/m³)
 O₂^{Sat20°C} Zuurstof verzadigingsconcentratie bij 20°C (kg O₂/m³). Dit is een vaste waarde van 0,00903 kg/m³
 T_{Proces} Temperatuur in de AT (°C)

$$k_L a_{O_2, T_{proces}} = \frac{AOTR}{(O_2^{SatT_{proces}} * O_2^{Proces}) * V_R} \quad (1.6)$$

Hierin is V het volume van de totale beluchtingstank. Voor de Meern is dit 4000 m^3 dit volume is op te delen in 80% (3000 m^3) als belucht gedeelte, en 20% is niet beluchte gedeelte (800 m^3). Nu moet alleen de $k_L a_{O_2, T_{proces}}$ omgezet worden naar de lachgas concentratie $k_L a_{N_2O, T_{proces}}$ met de formule;

$$k_L a_{N_2O, T_{proces}} = k_L a_{O_2, T_{proces}} * \sqrt{\frac{D_{N_2O}}{D_{O_2}}} \quad (0.2)$$

Diffusie coëfficiënten van lachgas in water en zuurstof in water:

$$D_{N_2O} = 1.77 * 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$

$$D_{O_2} = 2.12 * 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$

Resulteert in een factor 0,9137

Nu kan de emissie uitgerekend worden met de formules

$$r_{N_2O, i} = k_L a_{N_2O, T_{proces}} * S_{N_2O, T_{proces}} * V \quad (0.4)$$

$S_{N_2O, T_{proces}}$ De gemeten concentratie lachgas

V Het volume van het beluchte gedeelte van de tank (80% van het totale volume)

VOORBEELD BEREKENING

$$SOTR = P * SAE \quad (1.1)$$

P 66 kWh
SAE 2 kg O₂/kWh

SOTR = 118,8 kg O₂/h

$$AOTR = \frac{\alpha * F * SOTR * (B * O_2^{SatT_{proces}} - O_2^{Proces})}{O_2^{Sat20^{\circ}C}} * 1,024^{(T_{proces} - 20^{\circ}C)} \quad (1.5)$$

a 0,9
F 1
B 0,95
O₂^{SatT_{proces}} bij 22°C gelijk aan 0,00883 kg/m³.
O₂^{Proces} 0 kg O₂/m³
O₂^{Sat20°C} 0,00903 kg/m³
T_{Proces} 22 °C

AOTR = 104,12 kg O₂/h

$$k_L a_{O_2, T_{proces}} = \frac{AOTR}{(O_2^{Sat} - O_2^{Proces}) * V} \quad (1.6)$$

AOTR 104,12 kg O₂/h
O₂^{SatT_{proces}} 0,00883 kg/m³
V_R 4000 m³

$$k_L a_{N_2O, T_{proces}} = k_L a_{O_2, T_{proces}} * \sqrt{\frac{D_{N_2O}}{D_{O_2}}}$$

De waarden D_{N_2O} en D_{O_2} zijn vaste getallen te weten:

$$D_{N_2O} = 1.77 * 10^{-9} m^2 s^{-1}$$

$$D_{O_2} = 2.12 * 10^{-9} m^2 s^{-1}, \text{ wat resulteert in een factor } 0,9137$$

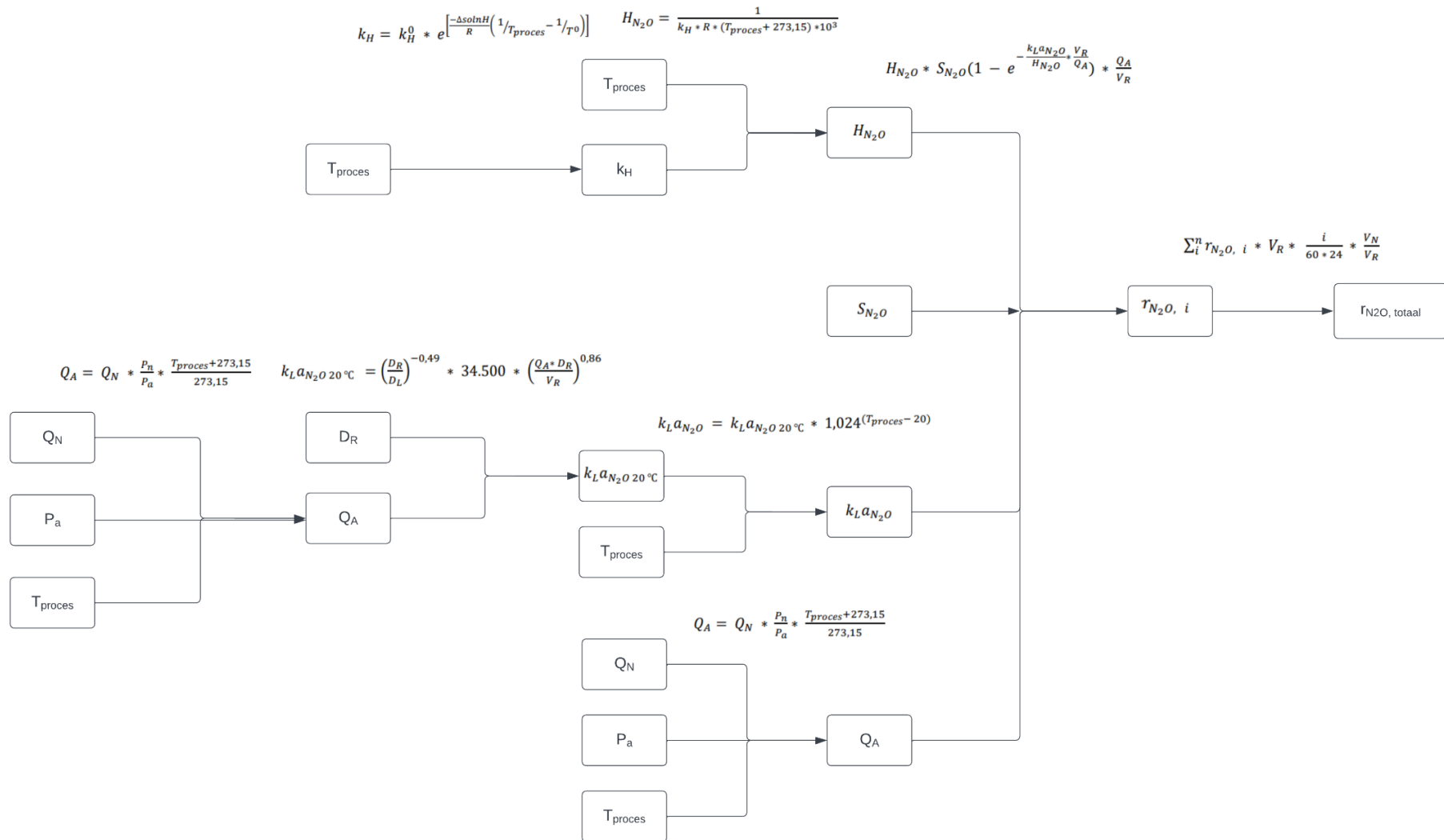
$$k_L a_{N_2O, T_{proces}} = 2,6938 \text{ h}^{-1}$$

$$NTR_{Aerated} = k_L a_{N_2O, T_{proces}} * S_{N_2O, T_{proces}} * V_R \quad (0.4)$$

S_{N₂O, T_{proces}} Gemeten lachgas beluchte gedeelte b.v. 0,1 mgN/l
V_R 80% van V_{tot} en dat is 3200 m³

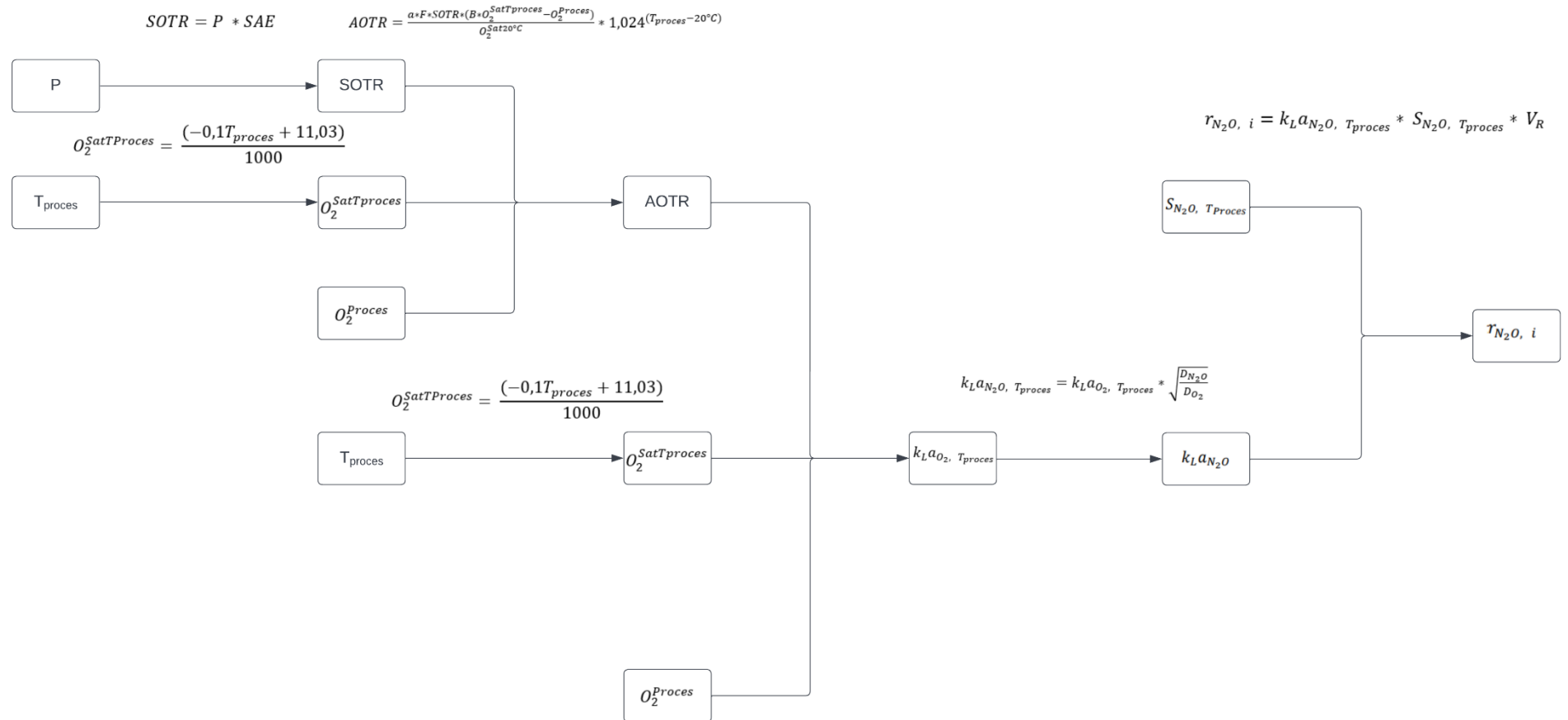
NTR = 1077,5 g N₂O/h of 25,86 kg N₂O/d

FLOWSCHEMA BEREKENING N₂O EMISSIE RWZI MET BELLENBELUCHTING

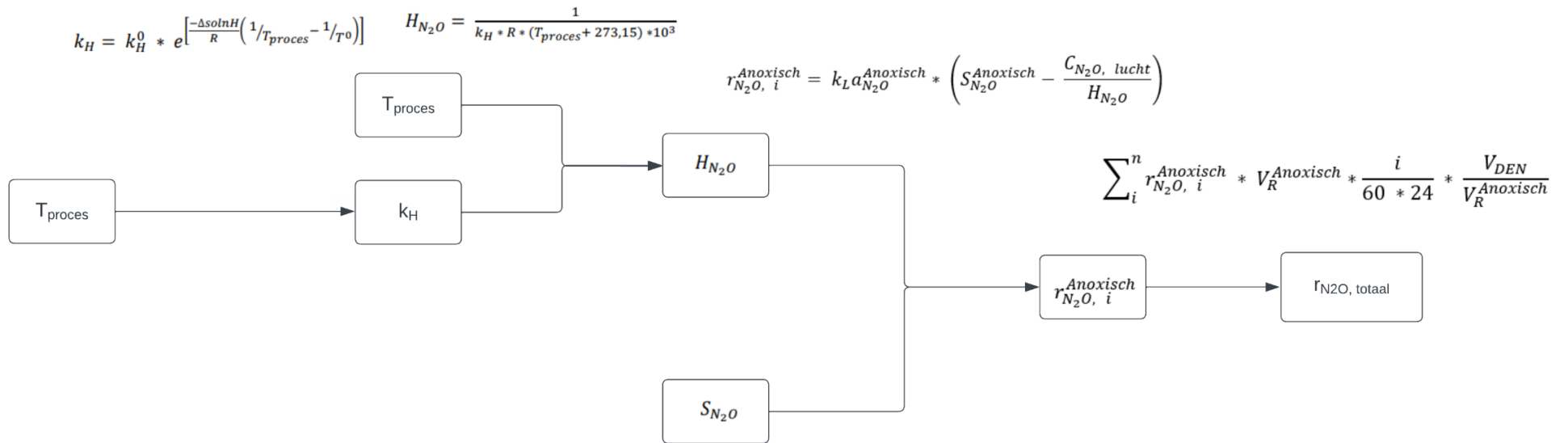


FLOWSCHEMA BEREKENING N₂O EMISSIE RWZI MET PUNTBELUCHTING

54



FLOWSCHEMA BEREKENING N₂O EMISSIE IN DE ANOXISCHE ZONE



BIJLAGE A7

LACHGASBEREKENINGEN HISTORIAN

UITLEG:

Calculation(Tagnummer, Waardebepoerkingmethode (SOM,GEM,..), starttijd, eindtijd, welke waardes meenemen (geen NaNs))

Alles waar een ' voor staat is tekstuele uitleg en geen onderdeel van de berekening.

'luchtstroom: luchtstroom in aerobe tank, gecorrigeerd voor druk en temp, in m³/h

temp = Calculation("LC.BC_1211TT85_NV", "Average", "Now-5min", "Now", Quality)

'Temperatuur

Pn = 1013.3 'Normale atmosferische druk

Pa = Calculation("LC.BC_8112PT43_DB", "Average", "Now-5min", "Now", Quality)+1013.3

'Druk in leidingen (komt binnen als overdruk)

Qn = Calculation("LC.BC_8112FT44_DB2", "Average", "Now-5min", "Now", Quality) 'Normale

volume stroom bij 273K, 1013mbar

Qa= Qn*Pn/Pa*(temp+273.15)/273.15 'Debiet bij actuele druk (Pa) en temperatuur (temp) in m³/h.

'coeff_corr: massaoverdracht coefficient gecorrigeerd voor temperatuur.

' Let op: Qa is hier in een andere eenheid. m³/h naar m/s, dus /(60*60).

Vr = 2625 'Volume van het beluchte deel van de reactor in AT 2.1

Dr = 5.00 'Diepte beluchter in aerobe zone

Dl = 0.815 'Diepte laboratoriumreactor

vg = Qa/(60*60)*(Dr/Vr)^0.86

coeff = (Dr/Dl)^(-0.49)*34500*vg

coeff_corr = coeff * 1.024^(temp-20)

'Sn: opgeloste concentratie lachgas gecorrigeerd voor temperatuur. De eenheid van de opgehaalde data is ug N₂O-N/L, terwijl de eenheid gehanteerd in de berekeningen van Unisense mg N₂O-N/L is. Daarom wordt de opgehaalde waarde gedeeld door 1000.

Sn = 1/1000 * Calculation("LC.BC_1212QT42_NV", "Average", "Now-5min", "Now", Quality)

'Opgeloste hoeveelheid lachgas

'lach_gedrag: gedraging lachgas volgens Henry's law

gas_const = 8.314*10^(-5) 'Gasconstante

e = 2.71828 'Natural e

solnh = 2675 'Enthalpie van de oplossing

$$K_h = 0.0247 \cdot e^{\left(\frac{\text{solnh}}{\text{temp} + 273.15} - \frac{1}{298.15}\right)}$$

$$\text{HN}_2\text{O} = \frac{1}{(K_h \cdot \text{gas_const} \cdot (\text{temp} + 273.15) \cdot 10^3)}$$

'Resultaat is lachgas emissie in kg N₂O-N/d

V_n = 11400 'Volume alle nitrificatiezones LvC

$$\text{Result} = (\text{HN}_2\text{O} \cdot \text{Sn} \cdot (1 - e^{-(\text{coeff_corr} / \text{HN}_2\text{O} \cdot \text{Vr} / (\text{Qa} \cdot 24))}) \cdot (\text{Qa} \cdot 24)) \cdot \text{Vn} / \text{Vr} / 1000^{60}$$

BIJLAGE A8

VASTE GEGEVENS AUTOMATISEREN

BEREKENINGEN

De vaste gegevens die benodigd zijn voor de berekeningen met belLENBLUCHTING:

TABEL 0.1 VASTE GEGEVENS BENODIGD VOOR HET BEREKENEN VAN DE LACHGASEMISSIE MET BELLENBELUCHTING

Grootheid	Eenheid	Betekenis	Waarde
R	m ³ /hPa/mol/K	Gasconstante, gedraging van gassen in een evenwicht.	8,314 * 10 ⁻⁵
K _K ⁰	mol/L/hPa	Henry's gasconstante.	0,0247
T ⁰	°C	Standaard temperatuur.	25
-ΔsolnH	°K	Enthalpie van de oplossing.	2675
D _L	m	De diepte van de laboratoriumreactor (testcondities)	0,815

De vaste gegevens voor het berekenen van de lachgasemissie op een rwzi met puntbeluchting:

TABEL 0.2 VASTE GEGEVENS BENODIGD VOOR HET BEREKENEN VAN DE LACHGASEMISSIE MET PUNTBELUCHTING

Grootheid	Eenheid	Betekenis	Waarde
SAE	kg O ₂ /kWh	Standaard beluchttingscapaciteit	2
a	-	Alfa factor	0,9
F	m ³ /hPa/mol/K	Universele gasconstante	8,314 * 10 ⁻⁵
B	°C	Standaard temperatuur	25
O ₂ ^{Sat20°C}	kg/m ³	Zuurstof verzadigingsconcentratie bij 1 atm en 20 graden Celsius	0,00903
D _{N₂O}	m ² /s	Diffusie coëfficiënt lachgas	1,77 * 10 ⁻⁹
D _{O₂}	m ² /s	Diffusie coëfficiënt zuurstof	2,12 * 10 ⁻⁹

Als laatste worden de vaste gegevens voor het berekenen van de lachgasemissie in de anoxische zone weergegeven:

TABEL 0.3 VASTE GEGEVENS BENODIGD VOOR HET BEREKENEN VAN DE LACHGASEMISSIE IN DE ANOXISCHE ZONE

Grootheid	Eenheid	Betekenis	Waarde
K _K ⁰	mol/L/hPa	Henry's gasconstante	0,0247
-ΔsolnH	°K	Enthalpie van de oplossing	2675
R	m ³ /hPa/mol/K	Universele gasconstante	8,314 * 10 ⁻⁵
T ⁰	°C	Standaard temperatuur	25
C _{N₂O, lucht}	g/mol/m ³	Evenwicht lachgasconcentratie in de lucht	3 * 10 ⁻⁴