

Ontwerpen voor minimale N₂O-emissies bij het nieuwe Kalmarsundsverket – waterrecyclinginstallatie (Zweden)



Kernpunten van de case:

- Er is een 'minimal N₂O by design'-aanpak gevolgd om de CO₂-voetafdruk van een nieuwe zuiveringsinstallatie al in de ontwerpfase te minimaliseren
- Het AMNOXA™-model visualiseerde de prestaties van de installatie en de N₂O-hotspots in 3D en bracht twee dominante risico's op N₂O-vorming in de ontwerpen van de nieuwe installatie aan het licht
- Op basis van de modelresultaten zijn kritieke ontwerpelementen aangepast: wijziging van de keerwand, locatie van de externe koolstofdosering en beluchtingsstrategieën
- De efficiëntie van de installatie is gemaximaliseerd, parallel met de minimalisatie van N₂O
- De modelresultaten worden ook gebruikt om toekomstige N₂O-meetlocaties te bepalen

Auteurs:



Dr. Qing Zhao,
Process and Development Engineer,
Kalmar Vatten



Dr. Giacomo Bellandi
Tech Lead,
AM-Team

Inleiding en probleemstelling

Het Zweedse waterbedrijf Kalmar Vatten bouwt met Kalmarsundsverket de toonaangevende stedelijke waterrecyclinginstallatie van Zweden. Dat past binnen de missie van het bedrijf om communaal afvalwater geavanceerd te zuiveren en klimaatneutraal te worden, en tegelijk de status van waterinfrastructuur te verhogen. Deze innovatieve installatie doet meer dan afvalwater zuiveren: ze produceert ook water voor hergebruik in irrigatie en industrie, gecertificeerde bodemverbeteraars en biogas voor warmte en elektriciteit. Voor Kalmar Vatten is het aanpakken van broeikasgasemissies in de ontwerpfase een cruciale stap naar klimaatneutraliteit, omdat procesemissies een aanzienlijke invloed hebben op hun CO₂-voetafdruk.

Kalmar Vatten schakelde AM-Team in om minimale emissies van lachgas (N₂O) te integreren in de ontwerpfase van hun nieuwe afvalwaterzuiveringsinstallatie Kalmarsundsverket. Het doel was de mechanismen van N₂O-vorming in de verschillende ontwerpvarianten te doorgronden en de optimale bioreactorconfiguraties te bepalen die de emissies minimaliseren en tegelijk de zuiveringsefficiëntie maximaliseren – de invulling van het principe ‘minimal N₂O by design’. AM-Team werkte nauw samen met de leverancier van de apparatuur (Xylem) en het ingenieursbureau (Eliquo Malmberg Water) om haalbare en effectieve mitigatieoplossingen te vinden.

Oplossing en doelstellingen

Deze vooruitziende digitale engineeringaanpak maakte het mogelijk om meerdere ontwerpconfiguraties virtueel te testen – configuraties die onmogelijk ter plaatse te evalueren zijn in een installatie die nog niet bestaat. Door de modelinzichten optimaal te benutten, konden de emissies omlaag en de efficiëntie omhoog vanaf de eerste bedrijfsdag.

De doelstellingen waren:

- de mechanismen van N_2O -vorming in de nieuwe bioreactorontwerpen doorgronden
- de plaatsing van roerwerken en beluchting optimaliseren om de N_2O -productie te minimaliseren
- mitigatiestrategieën voor verschillende ontwerpopties testen en vergelijken
- de optimale locaties voor N_2O -sensoren bepalen voor toekomstige monitoring
- efficiëntieverbeteringen integreren naast emissiereducties

"AMNOXA™ enabled us to test a multitude of design scenarios. We could see the exact effect of how different mixing options, aeration strategies, and carbon dosing locations would affect N_2O formation and plant performance."

'Met AMNOXA™ konden we een veelheid aan ontwerpscenario's testen. We zagen precies welk effect verschillende mengopties, beluchtingsstrategieën en locaties voor koolstofdosering hadden op de N_2O -vorming en op de prestaties van de installatie.'

- Dr. Qing Zhao, Process and Development Engineer,
Kalmar Vatten



Aanpak

Voor een integrale 3D-beoordeling van de nieuwe installatie is het AMNOXA™-modelleringsframework van AM-Team ingezet. AMNOXA™ combineert gespecialiseerde verwerking van zuiveringsdata met een mix van 3D- en dynamische modellering. Het 3D-model dat in dit project is gebruikt, bestaat uit een fysisch onderbouwd Computational Fluid Dynamics-model (CFD) met geïntegreerde biokinetiek. Nutriënten- en koolstofomzetting en de productie, het transport en de stripping van N_2O worden realistisch in rekening gebracht.

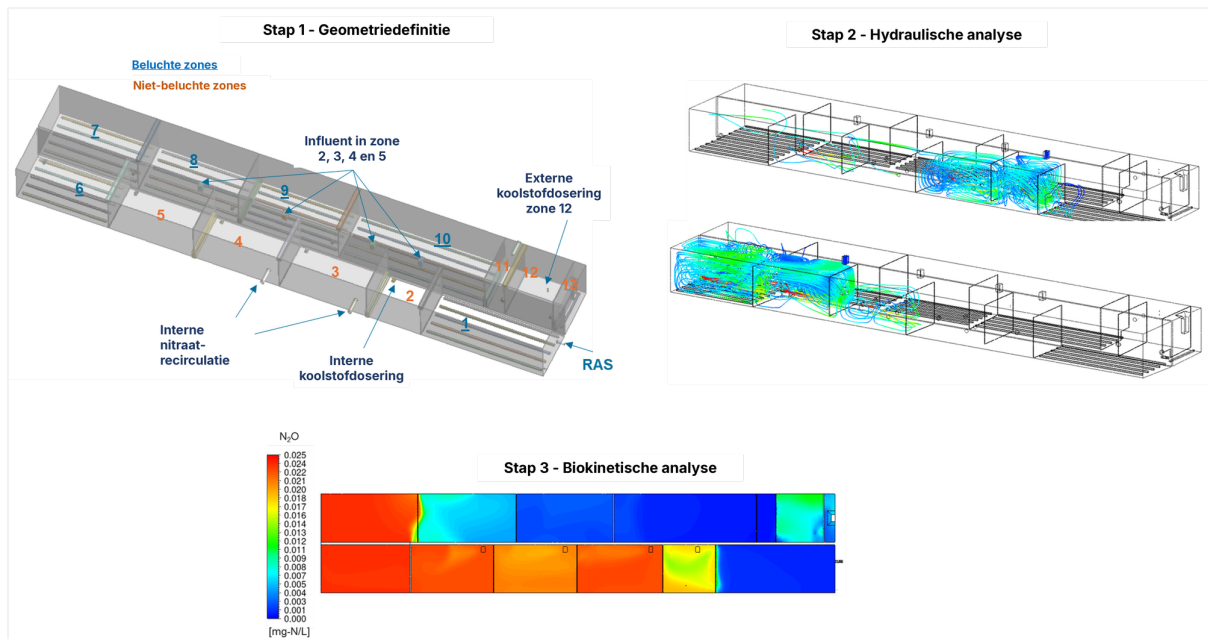
De modelleringsaanpak (figuur 1) omvatte:

- gedetailleerde reactorgeometrie met alle zones, in- en uitlaten, roerwerken en beluchtingselementen
- ontwerpgegevens voor twee scenario's: de inbedrijfstellingscondities van 2027 (18.000 m³/d) en de toekomstige capaciteit voor 2050 (27.000 m³/d)
- hydrodynamische analyse om mengpatronen en mogelijke terugstroming in kaart te brengen
- N_2O -hotspot- en oorzaakanalyse die de lokale drijvende krachten achter de N_2O -productie aanwijst
- virtueel testen van mitigatiescenario's, waaronder influentverdeling, beluchtingsstrategieën en optimalisatie van de koolstofdosering

“The 3D hotspot analysis is one of the key features of AMNOXA™, allowing to optimize biological treatment plants in a very effective manner.”

‘De 3D-hotspotanalyse is een van de kernfuncties van AMNOXA™ en maakt het mogelijk om biologische zuiveringsinstallaties heel effectief te optimaliseren.’

- Dr. Giacomo Bellandi, Tech Lead, AM-Team



Figuur 1. In een eerste stap werden 3D-modellen van de bestaande ontwerpen opgezet, gevolgd door een algemene hydraulische analyse (stap 2) en een biokinetische analyse (stap 3). Die laatste visualiseerde de prestaties van de installatie en de productie en emissie van N_2O in volledig 3D.

Resultaten en bevindingen

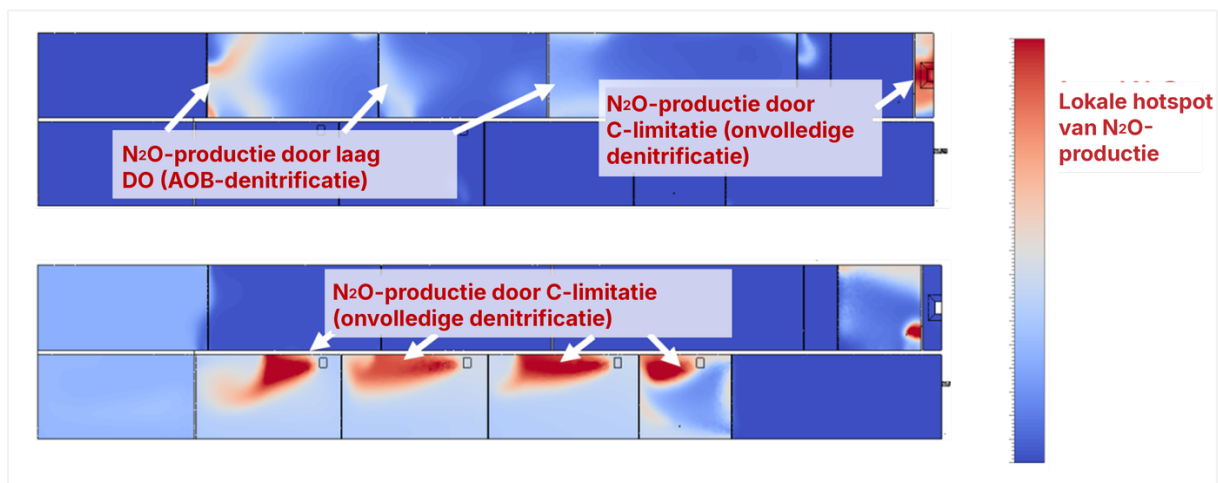
Oorzaakanalyse: inzicht in de mechanismen van N_2O -vorming

AMNOXA™ bracht de specifieke biochemische routes in kaart die de N_2O -vorming in het nieuwe reactorontwerp veroorzaken. Zoals de N_2O -heatmap in figuur 2 laat zien, werden twee primaire mechanismen geïdentificeerd die lokale ‘ N_2O -productiehotspots’ veroorzaken:

AOB-denitrificatie: Aan het begin van de aerobe zones zou een laag gehalte aan opgeloste zuurstof (DO) in combinatie met hoge ammoniakconcentraties de ammoniakoxiderende bacteriën (AOB) aanzetten tot N_2O -productie via de

denitrificatieroute¹. Dit was vooral duidelijk in zones (figuur 1) waar de overgang van anoxische naar aerobe omstandigheden een zone deed ontstaan waarin het DO-gehalte het setpoint niet snel kon bereiken, wat ideale omstandigheden voor deze route oplevert.

Heterotrofe denitrificatie: In anoxische zones waar de koolstof-stikstofverhouding (C/N) suboptimaal was, leidde onvolledige denitrificatie tot accumulatie van N₂O als tussenproduct². Het oorspronkelijke ontwerp vertoonde onvolledige denitrificatie, met name in zones waar de externe koolstofdosering nog niet volledig was gemengd en benut door heterotrofe bacteriën, waardoor hotspots van N₂O-productie ontstonden.



Figuur 2. Bovenaanzicht van de reactor met de **N₂O-hotspotanalyse**. De N₂O-productie door AOB-denitrificatie (boven) wijst op mogelijke verbetering van de beluchtungsverdeling en -strategie. De hotspots door heterotrofe denitrificatie (onder) laten een hoge N₂O-productieactiviteit zien in de nabijheid van de inlaatleidingen.

Ontwerptimalisatie: ‘minimal N₂O by design’

De kracht van N₂O-minimalisatie in de ontwerpfase werd duidelijk bij het testen van verschillende reactorconfiguraties. Elke ontwerpwijziging kon worden beoordeeld op het effect op zowel de N₂O-vorming als de algemene efficiëntie van de installatie:

Ongewenste terugstroming beperken: De hydrodynamische analyse bracht aanzienlijke terugstroming in enkele anoxische zones aan het licht. Uit het model bleek dat het aanpassen van de oriëntatie van de roerwerken of van de keerwanden de terugstroming met 70-80% kan verminderen zonder de mengefficiëntie aan te tasten.

¹ AOB-denitrificatie: hoewel AOB's horen te nitrificeren ($\text{NH}_4 + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_2$), kunnen ze bij hoge ammoniakconcentraties en een laag gehalte aan opgeloste zuurstof ook N₂O vormen: $\text{NO}_2 + \text{NH}_4 \rightarrow \text{N}_2\text{O}$ ('AOB-denitrificatie')

² Onvolledige denitrificatie: hoewel heterotrofe bacteriën volledig horen te denitrificeren ($\text{NO}_3 + \text{C} \rightarrow \text{N}_2$), kunnen ze bij koolstoflimitatie stoppen bij N₂O ($\text{NO}_3 + \text{C} \rightarrow \text{N}_2\text{O}$)

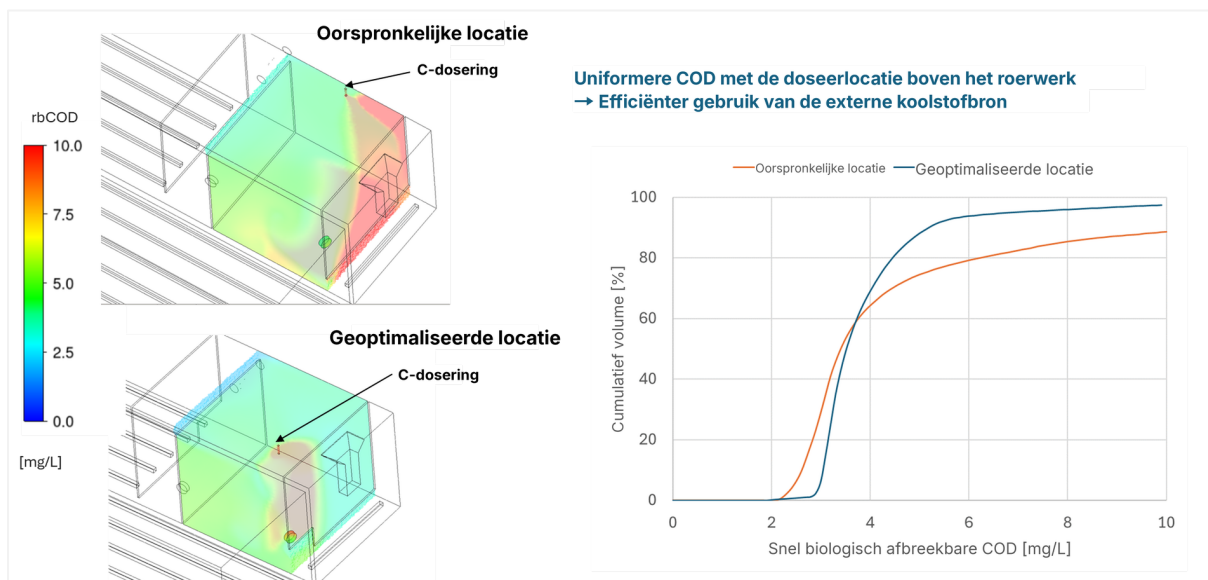
Deze ontwerpwijziging verbeterde de stromingspatronen en beperkte het risico op ongewenste zuurstofterugvoer naar de anoxische zones, wat de N_2O -productie via de AOB-denitrificatieroute zou hebben versterkt. Uiteindelijk koos het projectconsortium de aanpassing van de keerwand als de meest haalbare optie voor het definitieve ontwerp.

Locatie van de koolstofdosing: De resultaten toonden aan dat het verplaatsen van de externe koolstofdoseerleiding de C-verdeling en de volledigheid van de denitrificatie verbeterde (figuur 3). Deze uniforme C-verdeling – alleen bereikbaar via virtueel testen – verbeterde zowel de N_2O -mitigatie (door volledige denitrificatie te garanderen) als de operationele efficiëntie (door het koolstofgebruik te optimaliseren).

“AMNOXA™ is a solution that uniquely allows 'minimal N_2O by design'. This is crucial, as there is no monitoring data available in the design stage, but important decisions still need to be made. We wanted to achieve a design that had minimal N_2O baked in.”

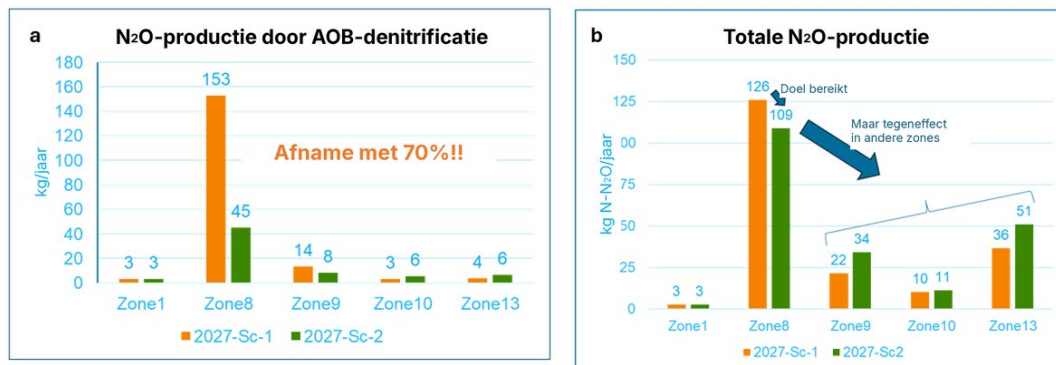
‘AMNOXA™ is een oplossing die als enige ‘minimal N_2O by design’ mogelijk maakt. Dat is cruciaal, want in de ontwerpfase zijn er geen meetgegevens beschikbaar terwijl er toch belangrijke beslissingen moeten worden genomen. Wij wilden een ontwerp waarin minimale N_2O al ingebakken zat.’

- Dr. Qing Zhao, Process and Development Engineer, Kalmar Vatten



Figuur 3. Verdeling van de chemicaliëndosering bij de oorspronkelijke (linksboven) en de geoptimaliseerde (linksonder) locatie van de koolstofdosing. Rechts laten de volumeverdelingscurves van de geoptimaliseerde configuratie een duidelijke verbetering zien in het bereiken van een quasi-volledige menging (verticale curve)

Beluchtingsstrategie: Virtueel testen liet zien dat meer beluchting in de eerste aerobe zone (zone 8) de AOB-denitrificatieactiviteit met 70% verlaagde (figuur 4a). Dit verhoogde echter ook de totale nitrificatie, met hogere nitraatgehalten en dus meer heterotrofe N_2O -productie in de beluchtingszones tot gevolg. Het netto-effect op N_2O was daardoor negatief (figuur 4b). Dit toonde aan hoe belangrijk een evenwichtig systeemontwerp is in plaats van geïsoleerde optimalisaties – een essentieel inzicht dat richting gaf aan de uiteindelijke aanbevelingen voor operationele regelstrategieën.



Figuur 4. Na de algemene systeemoptimalisatie is AMNOXA™ ingezet om specifieke routes aan te wijzen waarmee N_2O nog verder omlaag kan. Het aanpassen van de beluchting verlaagde de AOB-productie met 70% (a), maar had een negatief effect op de N_2O -productie door denitrificatie, met een netto toename van N_2O als gevolg (b). Deze maatregel is daarom niet doorgevoerd.

Efficiëntiewinst en prestatieverbetering (3E: Emissions, Effluent, Efficiency)

De ontwerpoptimalisaties leverden meer op dan alleen N_2O -mitigatie. Het principe ‘minimal N_2O by design’ leidde inherent tot een efficiëntere installatie:

Betere mengefficiëntie: Er werd minder terugstroming en een uniformer mengpatroon bereikt, wat de algemene zuiveringskinetiek verbetert en de zuurstofterugvoer voorkomt die aan N_2O -vorming zou hebben bijgedragen.

Efficiënter koolstofgebruik: Door de locatie van de koolstofdosing te optimaliseren verbeterde de verdelingsefficiëntie, waardoor dezelfde hoeveelheid externe koolstof een beter denitrificatieresultaat oplevert. Dat betekent mogelijke operationele besparingen door koolstofbronnen effectiever te gebruiken en tegelijk minder N_2O -emissies door onvolledige denitrificatie.

Betere effluentkwaliteit: De evenwichtige beluchtings- en koolstofdoseringsstrategieën die zijn ontworpen om N_2O te minimaliseren, verbeterden ook de stikstofverwijdering. Volledige denitrificatie betekent minder nitraatdoorslag en een betere effluentkwaliteit in het algemeen – wat de doelstelling van Kalmar Vatten ondersteunt om de stikstof en fosfor in het effluent met minstens 35% te verlagen ten opzichte van hun oude installatie, terwijl de installatie tegelijk een toenemende influentbelasting kan opvangen.

“AM-Team’s hotspot analysis revealed where and how N₂O was likely to be produced. By pinpointing and tackling those root causes, we could mitigate N₂O based on a scientifically sound methodology.”

‘De hotspotanalyse van AM-Team liet zien waar en hoe N₂O waarschijnlijk zou worden geproduceerd. Door die grondoorzaken precies aan te wijzen en aan te pakken, konden we N₂O beperken op basis van een wetenschappelijk onderbouwde methodiek.’

- Dr. Qing Zhao, Process and Development Engineer,
Kalmar Vatten



Sensorplaatsing voor toekomstige monitoring

Gezien het complexe en dynamische karakter van het systeem met meerdere wisselend beluchte zones heeft de AMNOXA™-analyse de optimale sensorlocaties voor toekomstige N₂O-monitoring bepaald. Uit de modellering bleek dat de emissies sterk kunnen variëren tijdens de overgang van anoxische naar aerobe omstandigheden en bij piekbelastingen. Voor volledige monitoring werd een dynamisch model of een digital-twinaanpak aanbevolen, ter ondersteuning van doorlopende optimalisatie tijdens de exploitatie van de installatie.

Conclusie en impact

Kalmar Vatten, de consortiumpartners Xylem en Eliquo Malmberg Water en AM-Team hebben met AMNOXA™-modellering klimaatsslimme ontwerpprincipes succesvol geïntegreerd in de nieuwe afvalwaterzuiveringsinstallatie. Door de mechanismen van N₂O-vorming al in de ontwerpfase te identificeren, konden de reactorconfiguraties vóór de bouw worden geoptimaliseerd – de invulling van het principe ‘minimal N₂O by design’.

De belangrijkste resultaten:

- volledig inzicht in de mechanismen van N₂O-vorming die specifiek zijn voor het nieuwe reactorontwerp, op basis van een 3D-N₂O-hotspotanalyse
- praktische ontwerpoptimalisaties: 70-80% minder terugstroming door verfijning van de keerwand, geoptimaliseerde locaties voor koolstofdosering en evenwichtige beluchtingsstrategieën
- identificatie van kritieke operationele parameters (DO-setpoint in de eerste aerobe zone, optimalisatie van de COD/N-verhouding) voor doorlopend N₂O-beheer

- gelijktijdige verbeteringen in emissies, effluentkwaliteit en operationele efficiëntie
 - de 3E-aanpak die de bredere circulaire-economievisie van Kalmar Vatten ondersteunt

"While N₂O often gets attention within existing treatment plants, significant mitigation impact can be made in the design stage prior to construction. AMNOXA™ is the only solution that allows minimal N₂O by design, in combination with maximizing general plant performance."

'N₂O krijgt vaak aandacht binnen bestaande zuiveringsinstallaties, maar juist in de ontwerpfase, vóór de bouw, is er veel mitigatiewinst te boeken. AMNOXA™ is de enige oplossing die 'minimal N₂O by design' mogelijk maakt, in combinatie met het maximaliseren van de algemene prestaties van de installatie.'

- Dr. Giacomo Bellandi, Tech Lead, AM-Team



Met AMNOXA™ kon de installatie grondig worden geëvalueerd vóór de bouw. Kalmar Vatten kan haar nieuwe installatie nu met vertrouwen in bedrijf nemen, in de wetenschap dat die van de grond af is ontworpen om de N₂O-emissies te minimaliseren en tegelijk de zuiveringsprestaties en de terugwinning van grondstoffen te maximaliseren. Dit project zet een nieuwe standaard voor klimaatbewuste afvalwaterinfrastructuur: minimale emissies mee-ontwerpen in plaats van later oplossingen inbouwen.

Uitgegeven door:

AM-Team BV

Sint-Pietersnieuwstraat 11

9000 Gent (BE)

+32 480 64 70 76

info@am-team.com

www.am-team.com

Documentnummer: 2026CC001

Versie 1

Over AM-Team:

AM-Team levert wereldwijd unieke modellerings- en datadiensten en digital-twinoplossingen om communale en industriële water- en afvalwaterzuiveringsinstallaties slim te ontwerpen, te optimaliseren en te digitaliseren. Het bedrijf heeft aan meer dan 200 locaties op 4 continenten gewerkt. AM-Team werkt rechtstreeks samen met waterbedrijven en daarnaast met ingenieursbureaus, softwarebedrijven en technologieleveranciers.

Support: Richt vragen over deze whitepaper aan info@am-team.com of aan uw contactpersoon bij AM Team.

Onder voorbehoud van wijzigingen en fouten. De informatie in dit document kan wijzigen in de loop van de verdere ontwikkeling van de producten/diensten.

© AM-Team 2026 Alle rechten voorbehouden