

Auslegung für minimale N₂O-Emissionen an der neuen Kalmarsundsverket - Water Recycling Plant (Schweden)



Die wichtigsten Punkte:

- Es wurde ein 'minimal N₂O by design'-Ansatz gewählt, um den CO₂-Fußabdruck einer neuen Kläranlage bereits in der Planungsphase zu minimieren
- Das AMNOXA™-Modell visualisierte die Anlagenleistung und die N₂O-Hotspots in 3D und deckte zwei dominante Risiken der N₂O-Bildung in den Entwürfen der neuen Anlage auf
- Auf Basis der Modellergebnisse wurden kritische Entwurfselemente angepasst: Änderung der Leitwand, Position der externen Kohlenstoffdosierung und Belüftungsstrategien
- Die Anlageneffizienz wurde parallel zur N₂O-Minimierung maximiert
- Die Modellergebnisse werden außerdem zur Festlegung künftiger N₂O-Messstellen genutzt

Autoren:



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



Dr. Giacomo Bellandi
Tech Lead,
AM-Team

Einleitung und Problemstellung

Der schwedische Wasserversorger Kalmar Vatten errichtet mit Kalmarsundsverket die führende städtische Recyclinganlage Schwedens. Das ist Teil seiner Mission, kommunales Abwasser weitergehend zu reinigen und klimaneutral zu werden und gleichzeitig den Stellenwert der Wasserinfrastruktur zu erhöhen. Diese innovative Anlage reinigt nicht nur Abwasser: Sie erzeugt auch Wasser für die künftige Wiederverwendung in Bewässerung und Industrie, zertifizierte Bodenverbesserer sowie Biogas für Wärme und Strom. Für Kalmar Vatten ist der Umgang mit Treibhausgasemissionen in der Planungsphase ein entscheidender Schritt zur Klimaneutralität, da Prozessemissionen den CO₂-Fußabdruck erheblich beeinflussen.

Kalmar Vatten beauftragte AM-Team damit, minimale Emissionen von Lachgas (N₂O) in die Planungsphase der neuen Kläranlage Kalmarsundsverket zu integrieren. Ziel war es, die Mechanismen der N₂O-Bildung in den verschiedenen Entwurfsvarianten zu verstehen und die optimalen Bioreaktorkonfigurationen zu ermitteln, die die Emissionen minimieren und gleichzeitig die Reinigungsleistung maximieren – die Umsetzung des Prinzips ‘minimal N₂O by design’. AM-Team arbeitete eng mit dem Ausrüstungslieferanten (Xylem) und dem Ingenieurbüro (Eliquo Malmberg Water) zusammen, um umsetzbare und wirksame Minderungsmaßnahmen zu finden.

Lösung und Zielsetzung

Der zukunftsorientierte digitale Engineering-Ansatz ermöglichte das virtuelle Testen mehrerer Entwurfskonfigurationen – Konfigurationen, die sich in einer noch nicht existierenden Anlage vor Ort unmöglich bewerten lassen. Durch die optimale Nutzung der Modellerkenntnisse ließen sich Emissionen senken und die Effizienz ab dem ersten Betriebstag steigern.

Die Ziele waren:

- die Mechanismen der N_2O -Bildung in den neuen Bioreaktorentwürfen zu verstehen
- die Positionierung von Rührwerken und Belüftung zu optimieren, um die N_2O -Produktion zu minimieren
- Minderungsstrategien für verschiedene Entwurfsoptionen zu testen und zu vergleichen
- die optimalen Positionen für N_2O -Sensoren für das künftige Monitoring zu bestimmen
- Effizienzsteigerungen zusammen mit Emissionsminderungen zu integrieren

"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."

„Mit AMNOXA™ konnten wir eine Vielzahl von Entwurfsszenarien testen. Wir konnten genau sehen, welche Wirkung unterschiedliche Mischoptionen, Belüftungsstrategien und Positionen der Kohlenstoffdosierung auf die N_2O -Bildung und die Anlagenleistung haben.“

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



Vorgehensweise

Für eine umfassende 3D-Bewertung der neuen Anlage wurde das AMNOXA™-Modellierungsframework von AM-Team eingesetzt. AMNOXA™ verbindet die spezialisierte Aufbereitung von Betriebsdaten mit einer Kombination aus 3D- und dynamischer Modellierung. Das in diesem Projekt verwendete 3D-Modell besteht aus einem physikalisch basierten Modell der numerischen Strömungsmechanik (CFD) mit integrierter Biokinetik. Nährstoff- und Kohlenstoffumsatz sowie Produktion, Transport und Strippung von N_2O werden realistisch berücksichtigt.

Die Modellierung (Abbildung 1) umfasste:

- detaillierte Reaktorgeometrie mit allen Zonen, Zu- und Abläufen, Rührwerken und Belüfterelementen
- Entwurfsdaten für zwei Szenarien: Inbetriebnahmebedingungen 2027 (18.000 m^3/d) und künftige Kapazität 2050 (27.000 m^3/d)
- hydrodynamische Analyse zur Ermittlung von Mischungsmustern und möglichen Rückströmungen

- N₂O-Hotspot- und Ursachenanalyse zur Bestimmung der lokalen Treiber der N₂O-Produktion
- virtuelles Testen von Minderungsszenarien, darunter Zulaufverteilung, Belüftungsstrategien und Optimierung der Kohlenstoffdosierung

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

„Die 3D-Hotspot-Analyse ist eine der zentralen Funktionen von AMNOXA™ und ermöglicht es, biologische Kläranlagen sehr wirkungsvoll zu optimieren.“

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

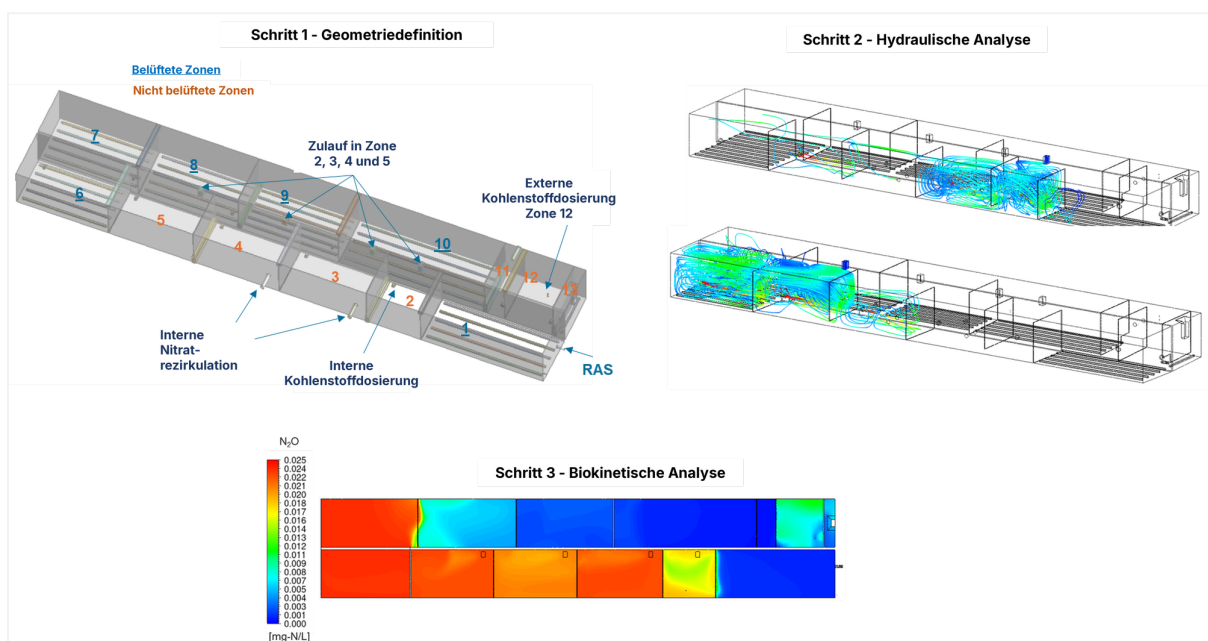


Abbildung 1. In einem ersten Schritt wurden 3D-Modelle der vorhandenen Entwürfe aufgebaut, gefolgt von einer allgemeinen hydraulischen Analyse (Schritt 2) und einer biokinetischen Analyse (Schritt 3). Letztere visualisierte die Anlagenleistung sowie Produktion und Emission von N₂O in vollständigem 3D.

Ergebnisse und Erkenntnisse

Ursachenanalyse: Verständnis der Mechanismen der N₂O-Bildung

AMNOXA™ machte die spezifischen biochemischen Pfade sichtbar, die die N₂O-Bildung im neuen Reaktorentwurf antreiben. Wie die N₂O-Heatmap in Abbildung 2 zeigt, wurden zwei primäre Mechanismen identifiziert, die lokale ‘N₂O-Produktions-Hotspots’ erzeugen:

AOB-Denitrifikation: Am Beginn der aeroben Zonen würde ein niedriger Gehalt an gelöstem Sauerstoff (DO) in Verbindung mit hohen Ammoniakkonzentrationen die ammoniakoxidierenden Bakterien (AOB) dazu veranlassen, über den Denitrifikationspfad N_2O zu bilden¹. Besonders deutlich war dies in Zonen (Abbildung 1), in denen der Übergang von anoxischen zu aeroben Bedingungen eine Zone entstehen ließ, in der der DO-Gehalt den Sollwert nur langsam erreichte – ideale Voraussetzungen für diesen Pfad.

Heterotrophe Denitrifikation: In anoxischen Zonen mit suboptimalem Kohlenstoff-Stickstoff-Verhältnis (C/N) führte die unvollständige Denitrifikation zur Anreicherung von N_2O als Zwischenprodukt². Der ursprüngliche Entwurf zeigte unvollständige Denitrifikation insbesondere in Zonen, in denen die externe Kohlenstoffdosierung noch nicht vollständig eingemischt und von heterotrophen Bakterien genutzt war, wodurch Hotspots der N_2O -Produktion entstanden.

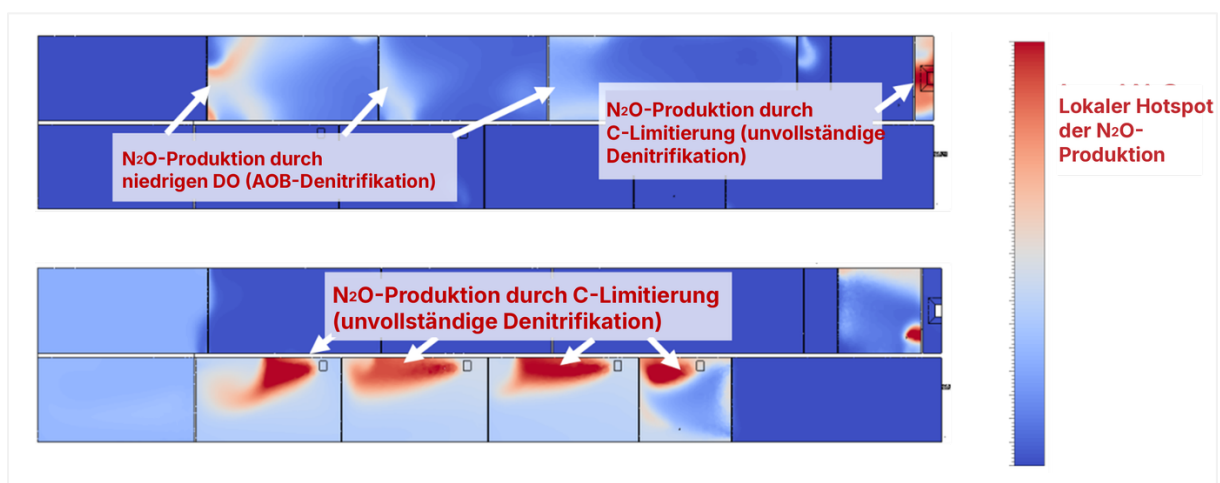


Abbildung 2. Draufsicht des Reaktors mit der **N_2O -Hotspot-Analyse**. Die N_2O -Produktion durch AOB-Denitrifikation (oben) weist auf mögliche Verbesserungen der Belüftungsverteilung und -strategie hin. Die durch heterotrophe Denitrifikation verursachten Hotspots (unten) zeigen eine hohe N_2O -Produktionsaktivität in der Nähe der Zulaufleitungen.

Entwurfsoptimierung: ‘minimal N_2O by design’

Wie wirkungsvoll die N_2O -Minimierung in der Planungsphase ist, wurde beim Testen verschiedener Reaktorkonfigurationen deutlich. Jede Entwurfsänderung konnte

¹ AOB-Denitrifikation: AOB sollten eigentlich nitrifizieren ($\text{NH}_4 + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_2$), können aber bei hohen Ammoniakkonzentrationen und niedrigem Gehalt an gelöstem Sauerstoff auch N_2O bilden: $\text{NO}_2 + \text{NH}_4 \rightarrow \text{N}_2\text{O}$ (‘AOB-Denitrifikation’)

² Unvollständige Denitrifikation: heterotrophe Bakterien sollten eigentlich vollständig denitrifizieren ($\text{NO}_3 + \text{C} \rightarrow \text{N}_2$), können bei Kohlenstofflimitierung aber bei N_2O stehen bleiben ($\text{NO}_3 + \text{C} \rightarrow \text{N}_2\text{O}$)

hinsichtlich ihrer Wirkung sowohl auf die N₂O-Bildung als auch auf die Gesamteffizienz der Anlage bewertet werden:

Unerwünschte Rückströmungen mindern: Die hydrodynamische Analyse deckte erhebliche Rückströmungen in einigen anoxischen Zonen auf. Das Modell zeigte, dass eine Anpassung der Ausrichtung der Rührwerke oder der Leitwände die Rückströmungen um 70-80% verringern kann, ohne die Mischeffizienz zu beeinträchtigen. Diese Entwurfsänderung verbesserte die Strömungsmuster und minimierte das Risiko einer unerwünschten Sauerstoffrückführung in die anoxischen Zonen, die die N₂O-Produktion über den AOB-Denitrifikationspfad verstärkt hätte. Letztlich wählte das Projektkonsortium die Anpassung der Leitwand als am besten umsetzbare Option für den endgültigen Entwurf.

Position der Kohlenstoffdosierung: Die Ergebnisse zeigten, dass eine Verlegung der externen Kohlenstoffdosierleitung die C-Verteilung und die Vollständigkeit der Denitrifikation verbesserte (Abbildung 3). Diese gleichmäßige C-Verteilung – nur durch virtuelles Testen erreichbar – verbesserte sowohl die N₂O-Minderung (durch Sicherstellung einer vollständigen Denitrifikation) als auch die betriebliche Effizienz (durch Optimierung des Kohlenstoffeinsatzes)

“AMNOXA™ is a solution that uniquely allows 'minimal N₂O 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 N₂O baked in.”

„AMNOXA™ ist eine Lösung, die als Einzige 'minimal N₂O by design' ermöglicht. Das ist entscheidend, denn in der Planungsphase liegen keine Messdaten vor, es müssen aber dennoch wichtige Entscheidungen getroffen werden. Wir wollten einen Entwurf erreichen, in dem minimale N₂O-Emissionen von Anfang an angelegt sind.“

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



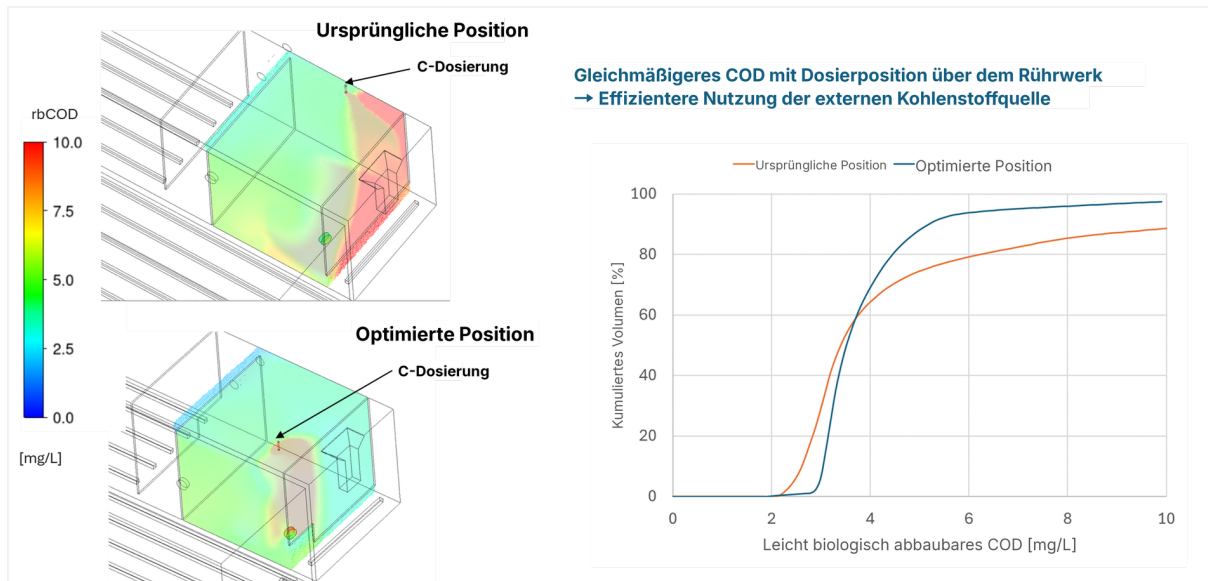


Abbildung 3. Verteilung der Chemikaliendosierung bei ursprünglicher (oben links) und optimierter (unten links) Position der Kohlenstoffdosierung. Rechts zeigen die Volumenverteilungskurven der optimierten Konfiguration eine deutliche Verbesserung beim Erreichen einer quasi vollständigen Durchmischung (vertikale Kurve)

Belüftungsstrategie: Virtuelles Testen zeigte, dass eine verstärkte Belüftung in der ersten aeroben Zone (Zone 8) die AOB-Denitrifikationsaktivität um 70% senkte (Abbildung 4a). Dadurch stieg jedoch auch die Gesamtnitrifikation, was zu höheren Nitratgehalten und in der Folge zu mehr heterotropher N_2O -Produktion in den Belüftungszonen führte. Die Nettowirkung auf N_2O war daher negativ (Abbildung 4b). Dies zeigte, wie wichtig ein ausgewogener Systementwurf gegenüber isolierten Optimierungen ist – eine zentrale Erkenntnis, die die endgültigen Empfehlungen für die betrieblichen Regelstrategien geprägt hat.

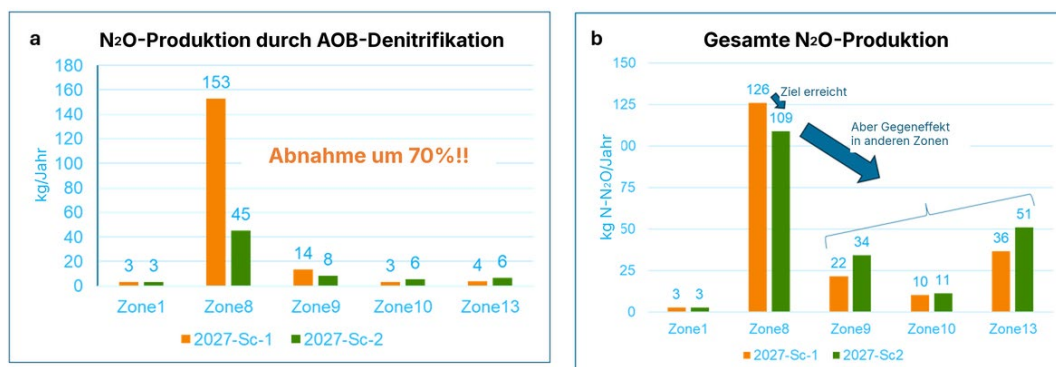


Abbildung 4. Nach der allgemeinen Systemoptimierung wurde AMNOXA™ eingesetzt, um weitere spezifische Pfade zu bestimmen, mit denen N_2O noch weiter gesenkt werden kann. Die Anpassung der Belüftung senkte die AOB-Produktion um 70% (a), beeinträchtigte jedoch die N_2O -Produktion durch Denitrifikation, was zu einem Nettoanstieg von N_2O führte (b). Diese Maßnahme wurde daher nicht umgesetzt.

Effizienzgewinne und Leistungsverbesserung (3E: Emissions, Effluent, Efficiency)

Die Entwurfsoptimierungen brachten mehr als nur eine N_2O -Minderung. Das Prinzip 'minimal N_2O by design' führte inhärent zu einer effizienteren Anlage:

Verbesserte Mischeffizienz: Es wurden geringere Rückströmungen und gleichmäßigere Mischungsmuster erreicht, was die Reinigungskinetik insgesamt verbessert und die Sauerstoffrückführung verhindert, die zur N_2O -Bildung beigetragen hätte.

Verbesserte Kohlenstoffnutzung: Die Optimierung der Position der Kohlenstoffdosierung verbesserte die Verteilungseffizienz, sodass dieselbe Menge externen Kohlenstoffs ein besseres Denitrifikationsergebnis erzielt. Das bedeutet mögliche Betriebskosteneinsparungen durch einen wirksameren Einsatz von Kohlenstoffquellen und gleichzeitig geringere N_2O -Emissionen aus unvollständiger Denitrifikation.

Bessere Ablaufqualität: Die ausgewogenen Belüftungs- und Kohlenstoffdosierstrategien, die auf die Minimierung von N_2O ausgelegt sind, verbesserten auch die Stickstoffentfernung. Eine vollständige Denitrifikation bedeutet weniger Nitratdurchbruch und insgesamt eine bessere Ablaufqualität – was das Ziel von Kalmar Vatten unterstützt, Stickstoff und Phosphor im Ablauf gegenüber der alten Anlage um mindestens 35% zu senken und dabei künftig steigende Zulaufbelastungen zu bewältigen.

"AM-Team's hotspot analysis revealed where and how N_2O was likely to be produced. By pinpointing and tackling those root causes, we could mitigate N_2O based on a scientifically sound methodology."

„Die Hotspot-Analyse von AM-Team zeigte, wo und wie N_2O voraussichtlich entsteht. Indem wir diese Ursachen genau bestimmt und angegangen sind, konnten wir N_2O auf Basis einer wissenschaftlich fundierten Methodik mindern.“

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



Sensorpositionierung für das künftige Monitoring

Angesichts des komplexen und dynamischen Charakters des Systems mit mehreren wechselweise belüfteten Zonen hat die AMNOXA™-Analyse die optimalen Sensorpositionen für das künftige N_2O -Monitoring bestimmt. Die Modellierung zeigte,

dass die Emissionen während der Übergänge von anoxischen zu aeroben Bedingungen und bei Spitzenbelastungen stark schwanken können. Für ein umfassendes Monitoring wurde ein dynamisches Modell bzw. ein Ansatz mit digitalem Zwilling empfohlen, um die laufende Optimierung im Anlagenbetrieb zu unterstützen.

Fazit und Wirkung

Kalmar Vatten, die Konsortialpartner Xylem und Eliquo Malmberg Water sowie AM-Team haben mithilfe der AMNOXA™-Modellierung klimaintelligente Entwurfsprinzipien erfolgreich in die neue Kläranlage integriert. Durch die Identifikation der Mechanismen der N₂O-Bildung bereits in der Planungsphase konnten die Reaktorkonfigurationen vor dem Bau optimiert werden – die Umsetzung des Prinzips ‘minimal N₂O by design’.

Die wichtigsten Ergebnisse:

- umfassendes Verständnis der Mechanismen der N₂O-Bildung speziell für den neuen Reaktorentwurf auf Basis einer 3D-N₂O-Hotspot-Analyse
- praxistaugliche Entwurfsoptimierungen: 70-80% weniger Rückströmung durch Verfeinerung der Leitwand, optimierte Positionen der Kohlenstoffdosierung und ausgewogene Belüftungsstrategien
- Identifikation kritischer Betriebsparameter (DO-Sollwert in der ersten aeroben Zone, Optimierung des COD/N-Verhältnisses) für das laufende N₂O-Management
- gleichzeitige Verbesserungen bei Emissionen, Ablaufqualität und betrieblicher Effizienz – der 3E-Ansatz, der die umfassendere Kreislaufwirtschaftsvision von Kalmar Vatten unterstützt

“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 erhält innerhalb bestehender Kläranlagen häufig Aufmerksamkeit, doch bereits in der Planungsphase vor dem Bau lässt sich eine erhebliche Minderungswirkung erzielen. AMNOXA™ ist die einzige Lösung, die ‘minimal N₂O by design’ ermöglicht – in Verbindung mit der Maximierung der allgemeinen Anlagenleistung.“

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



Mit AMNOXA™ konnte die Anlage vor dem Bau eingehend bewertet werden. Kalmar Vatten kann seine neue Anlage nun mit Zuversicht in Betrieb nehmen, im Wissen, dass sie von Grund auf darauf ausgelegt ist, die N₂O-Emissionen zu minimieren und

gleichzeitig Reinigungsleistung und Ressourcenrückgewinnung zu maximieren. Dieses Projekt setzt einen neuen Standard für klimabewusste Abwasserinfrastruktur: minimale Emissionen von Anfang an mitzuplanen, anstatt später Lösungen nachzurüsten.

Herausgegeben von:
AM-Team BV
Sint-Pietersnieuwstraat 11
9000 Gent (BE)
+32 480 64 70 76
info@am-team.com
www.am-team.com

Dokumentnummer: 2026CC001
Version 1

Über AM-Team:

AM-Team bietet weltweit einzigartige Modellierungs- und Datendienstleistungen sowie Lösungen mit digitalen Zwillingen, um kommunale und industrielle Wasser- und Abwasserbehandlungsanlagen intelligent zu planen, zu optimieren und zu digitalisieren. Das Unternehmen hat an über 200 Standorten auf 4 Kontinenten gearbeitet. AM-Team arbeitet direkt mit Wasserversorgern zusammen und kooperiert darüber hinaus mit Ingenieurbüros, Softwareunternehmen und Technologieanbietern.

Support: Richten Sie Fragen zu diesem Whitepaper bitte an info@am-team.com oder an Ihre Ansprechperson bei AM Team.

Änderungen und Irrtümer vorbehalten. Die Angaben in diesem Dokument können sich im Zuge der weiteren Entwicklung der Produkte/Dienstleistungen ändern.