

Minderung von N₂O-Emissionen sowie Verbesserung von Leistung und Effizienz in einer industriellen Abwasserbehandlungsanlage



Kernpunkte der Referenz

- 3 wesentliche Hotspots der N₂O-Bildung und deren Grundursachen identifiziert
- Modelle stimmten mit den Sensordaten und den N₂O-Messungen in der Flüssigphase überein
- Kohlenstofflimitierung als dominante Grundursache für N₂O identifiziert
- Erwartete Wirkung: 87 % Reduktion der N₂O-Emissionen; 10 % Einsparung an externem Kohlenstoff; 10–15 % Reduktion des TN im Ablauf

Einleitung und Problemstellung

Das niederländische Wasserunternehmen Evides Industriewater betreibt mehrere Abwasserbehandlungsanlagen in den Niederlanden. An einem seiner industriellen Abwasserbehandlungsstandorte (Abbildung 1) untersuchte das Unternehmen Möglichkeiten, die Anlage zu optimieren und gleichzeitig die Treibhausgasemissionen zu senken. Lachgasmessungen (N_2O) im Rahmen einer temporären Messkampagne zeigten hochdynamische Prozessemissionen mit deutlichen Spitzen. Die tatsächlichen N_2O -Quellen waren schwer zu bestimmen, da mehrere Faktoren – oder eine Kombination daraus – die Emissionen verursacht haben konnten. Da die Grundursachen unklar waren, war es für Evides Industriewater schwierig, Minderungsmaßnahmen zu identifizieren und zu priorisieren, die sich sowohl auf den CO_2 -Fußabdruck als auch auf die Anlagenleistung positiv auswirken.



Abbildung 1: Aufbau und Konfiguration der untersuchten industriellen Abwasserbehandlungsanlage. Das Abwasser hat kommunale Eigenschaften, ist jedoch hochdynamisch und weist eine recht hohe Ammoniakbelastung auf.

Projektziele

Das primäre Ziel dieses Projekts besteht darin, die Grundursachen der Lachgasemissionen (N_2O) in der industriellen Abwasserbehandlungsanlage von Evides Industriewater zu identifizieren und zu mindern und gleichzeitig die Gesamtleistung der Anlage zu verbessern.

Anlagenmerkmale

- Industrielle WWTP mit kommunalen Eigenschaften
- Reaktortyp: konventionelle Belebtschlammanlage mit vorgeschalteter Denitrifikation
- Höher konzentriert an NH_4 und weniger COD; komplexe Zulaufdynamik
- Onsite- N_2O -Monitoring in der Flüssigphase durchgeführt
- EF geschätzt auf 0,16 % (0,016 N_2O -N / zulaufendes NH_4 -N) (hoch/niedrig)

Lösung und Zielsetzung

Evides Industriewater arbeitete mit AM-Team zusammen, um die Grundursachen von N_2O zu ermitteln und die besten Minderungsstrategien zu bestimmen. Eine solche modellbasierte Bewertung auf Grundlage realer Anlagendaten liefert zentrale Erkenntnisse, die sich aus Onsite-Daten allein nicht gewinnen lassen.

Die Ziele waren:

- die allgemeine Anlagenleistung zu screenen
- die Grundursachen von N_2O zu identifizieren
- diese Grundursachen nach ihrem Beitrag zu priorisieren
- Minderungsstrategien virtuell zu testen, die gleichzeitig der Anlagenleistung und dem CO_2 -Fußabdruck zugutekommen
- diese Strategien hinsichtlich Wirkung und Umsetzbarkeit zu priorisieren

“The multitude of strategies tested by the model were impossible to evaluate onsite at the real plant. Based on a scientifically sound methodology, we were able to test and rank mitigation measures and identified the most promising ones to implement.”

„Die Vielzahl der mit dem Modell getesteten Strategien war onsite in der realen Anlage unmöglich zu bewerten. Auf Basis einer wissenschaftlich fundierten Methodik konnten wir Minderungsmaßnahmen testen und priorisieren und haben die vielversprechendsten für die Umsetzung identifiziert.“

- Ioanna Gkoutzamani, Process Engineer | Evides Industriewater



Vorgehensweise

Für die 3D- und die dynamische Bewertung wurden das 3D-CFD- N_2O -Modell und das dynamische N_2O -Modell von AM-Team eingesetzt. Beide Modelle erfüllen unterschiedliche Zwecke: Das 3D-Modell zeigt räumliche Muster und lokale N_2O -Hotspots, während das dynamische Modell die dynamische Anlagenreaktion als Funktion der Zeit auf Basis der Zulaufdynamik abbildet. Beide Modelle wurden anhand realer Anlagendaten kalibriert und validiert.

Es wurden 3 Arten von Eingangsdaten verwendet (eine Mischung aus Online- und Offline-Daten):

- verfügbare Zulaufdaten (Volumenströme, COD, Ammoniak, ...)
- Betriebsdaten (z. B. Luftmengen, Kohlenstoffdosierung, ...)
- Anlagenplanungsdaten (Dimensionierung, Layout)

Die Simulationen wurden unter verschiedenen Betriebsbedingungen durchgeführt, die die realen Verhältnisse widerspiegeln. Die „What-if“-Minderungsszenarien umfassten betriebliche Anpassungen, die über den aktuellen Betrieb hinausgehen.

Ergebnisse und Erkenntnisse

Grundursachenanalyse

Das 3D-Profil des gelösten Sauerstoffs (DO) in Abbildung 2 zeigt, dass der überwiegende Teil der aeroben Zonen sehr niedrige DO-Werte aufwies. Erst im zweiten Teil der aeroben Zone 2 stiegen die DO-Werte auf etwa 2 mg/L an. Niedrige DO-Werte begünstigten die lokale N_2O -Bildung in den aeroben Zonen (Abbildung 2, rechts). Darüber hinaus verursachte auch die Rückführung von DO in die anoxische Zone dort lokal einen N_2O -Hotspot, bedingt durch die hohen Ammoniakkonzentrationen an dieser Stelle. Neben dem Einfluss des DO führte auch eine Kohlenstofflimitierung in der anoxischen Zone 1 zu einem N_2O -Hotspot. Damit konnten 3 wesentliche Grundursachen identifiziert werden. Für die Grundursache Kohlenstofflimitierung wurde erwartet, dass sie der dominante Pfad ist, mit einem geschätzten relativen Beitrag von >90 %.

“The 3D root cause analysis by our CFD - N_2O model is comparable to an x-ray scan in the hospital: it provides a heat map of hot spots of N_2O production (red) and consumption (blue). These visuals not only provide immediate understanding of what drives the N_2O emissions, but can also be easily understood by everyone.”

„Die 3D-Grundursachenanalyse mit unserem CFD- N_2O -Modell ist mit einer Röntgenaufnahme im Krankenhaus vergleichbar: Sie liefert eine Heatmap der Hotspots von N_2O -Bildung (rot) und -Zehrung (blau). Diese Visualisierungen machen nicht nur unmittelbar verständlich, was die N_2O -Emissionen antreibt, sondern sind auch für jeden leicht nachvollziehbar.“

- Dr. Giacomo Bellandi, Technology Lead | AM-Team



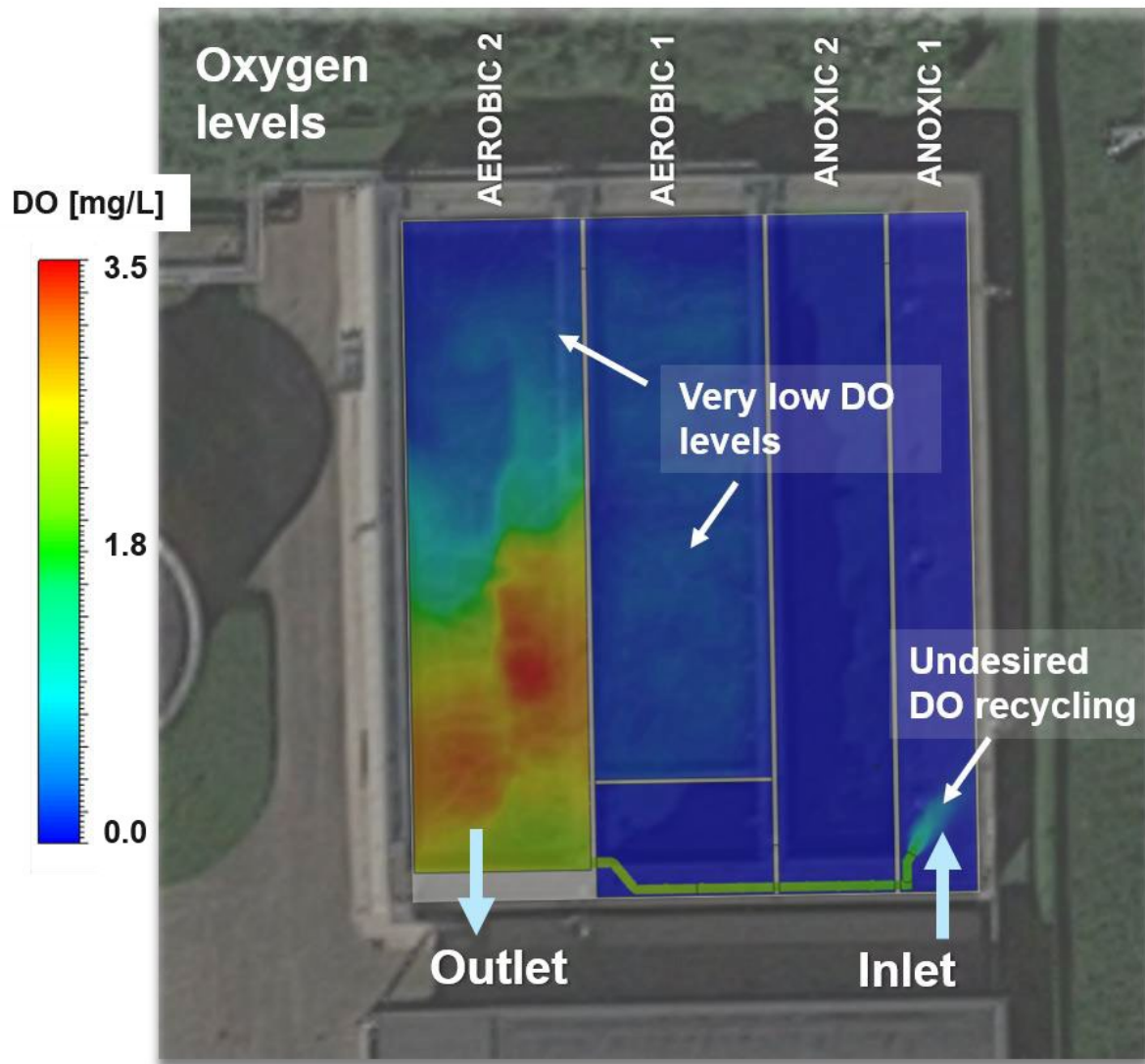


Abbildung 2(a)

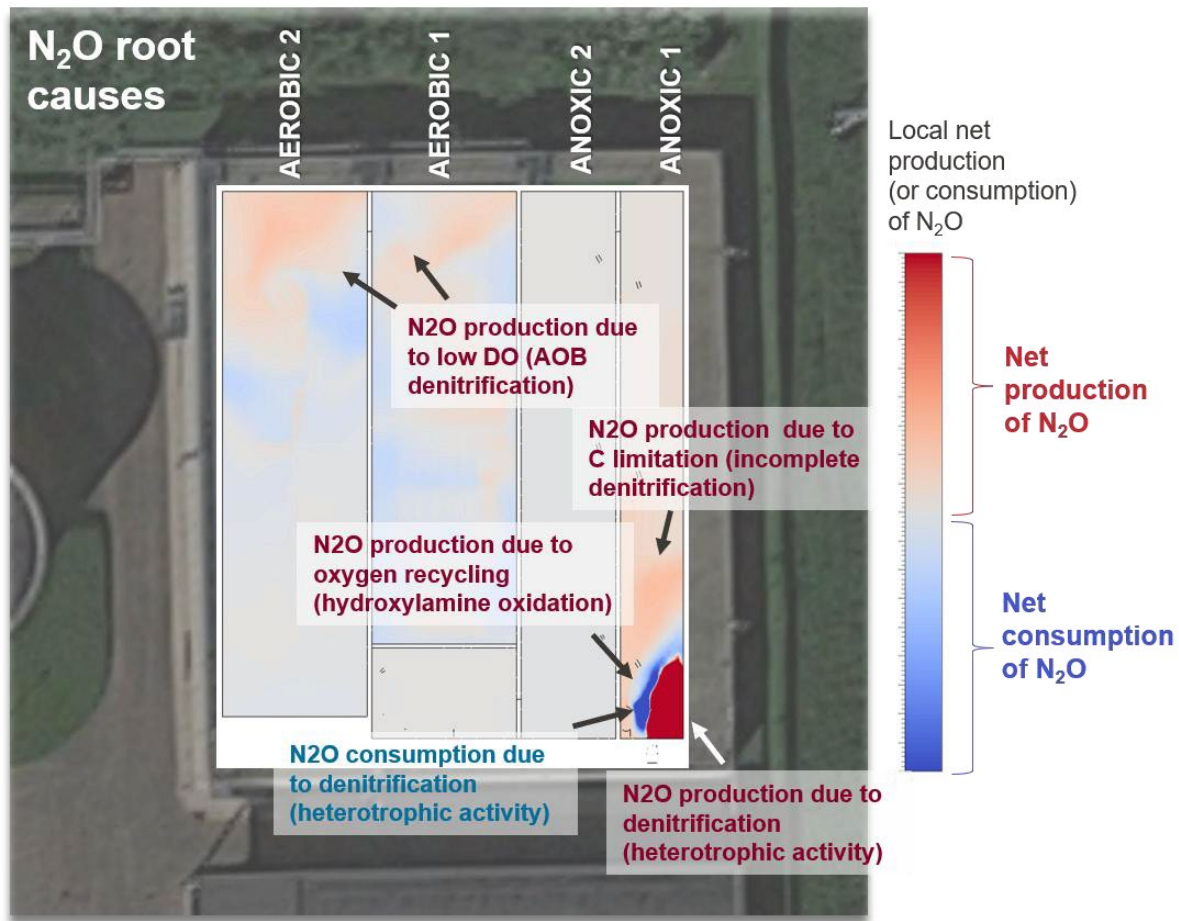


Abbildung 2(b)

Abbildung 2 (a) & (b): 3D-DO-Werte (links) sowie lokale Bildung/Zehrung von N_2O (rechts). In verschiedenen Bereichen des Bioreaktors wurden unterschiedliche N_2O -Hotspots identifiziert.

Die temporäre N_2O -Messkampagne von Evides Industrierwater zeigte deutliche Dynamiken und Spitzen und damit ein dynamisches Emissionsprofil (Abbildung 3) mit 2 Spitzen pro Tag. Auf Basis der verfügbaren Onsite-Anlagendaten kalibriert, gab das dynamische Modell DO, Ammoniak und letztlich die N_2O -Dynamik wieder. Bemerkenswert ist, dass trotz einer recht begrenzten Datenlage zum Zulauf brauchbare Anpassungen erzielt werden konnten. Zusätzliche Zulaufinformationen – insbesondere zum Kohlenstoff im Zulauf – könnten die Modellgenauigkeit weiter verbessern; das Modell wurde jedoch als ausreichend geeignet bewertet, um mit der virtuellen Erprobung von Minderungsstrategien zu beginnen.

Das dynamische Modell bestätigte zudem, dass die C-Limitierung (die die heterotrophe Denitrifikation begrenzt) die dominante Grundursache der Spitzen war, sodass die virtuelle Erprobung von Minderungsstrategien beginnen konnte.

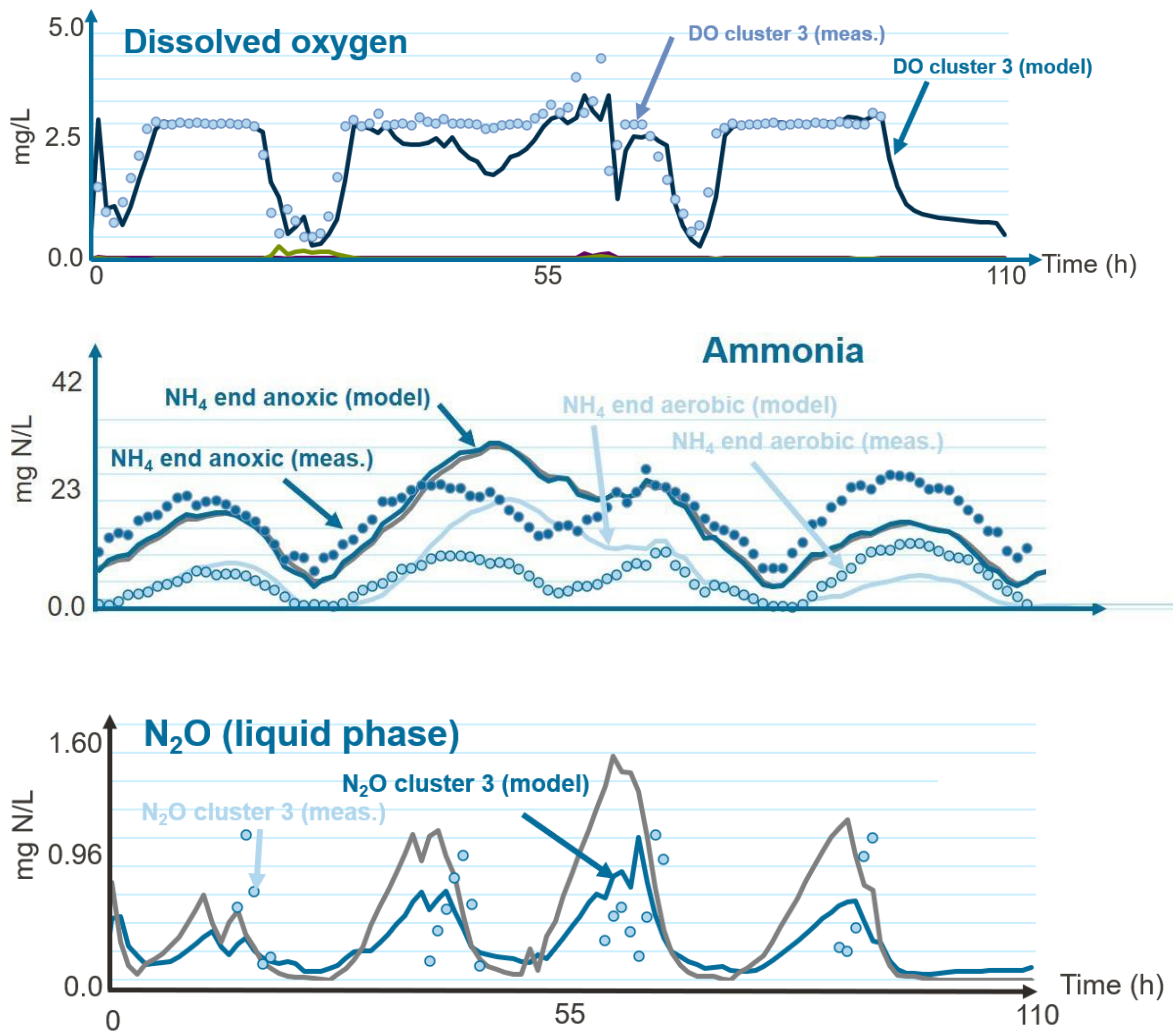


Abbildung 3: Dynamische Profile der gemessenen (Punkte) und der berechneten (Linien) DO-, Ammoniak- und N₂O-Werte in der Flüssigphase. Die deutliche N₂O-Dynamik konnte durch das dynamische Modell abgebildet werden.

Virtuelle Erprobung von Minderungsstrategien

Da das Modell die Grundursachen von N₂O identifizieren konnte, wurde es anschließend genutzt, um „What-if“-Szenarien zu rechnen, mit dem Ziel, diese Emissionen zu senken und die allgemeine Anlagenleistung und Effizienz zu verbessern. Diese „virtuelle Erprobung von Minderungsstrategien“ zeigte, dass die Anpassung der Kohlenstoffdosierung eine zentrale Minderungsstrategie ist. Die Wirkung der verschiedenen angepassten C-Dosierstrategien auf die N₂O-Spitzen wird in Abbildung 4 deutlich sichtbar.

Obwohl die C-Dosierung bereits fester Bestandteil des Betriebs war, lag der Schlüssel in der zeitlichen Anpassung der Dosierstrategie. Nach den Simulationsergebnissen könnte eine „optimierte C-Dosierstrategie“ (COD-proportional) die Emissionen um 87 % und den Kohlenstoffbedarf der Dosierung um 10 % senken. Zusätzlich wurde erwartet, dass

der Gesamtstickstoff (TN) im Ablauf um 10–15 % zurückgeht. Wie das dynamische N₂O-Muster zeigt, verschwinden die Spitzen mit dieser Strategie voraussichtlich vollständig.

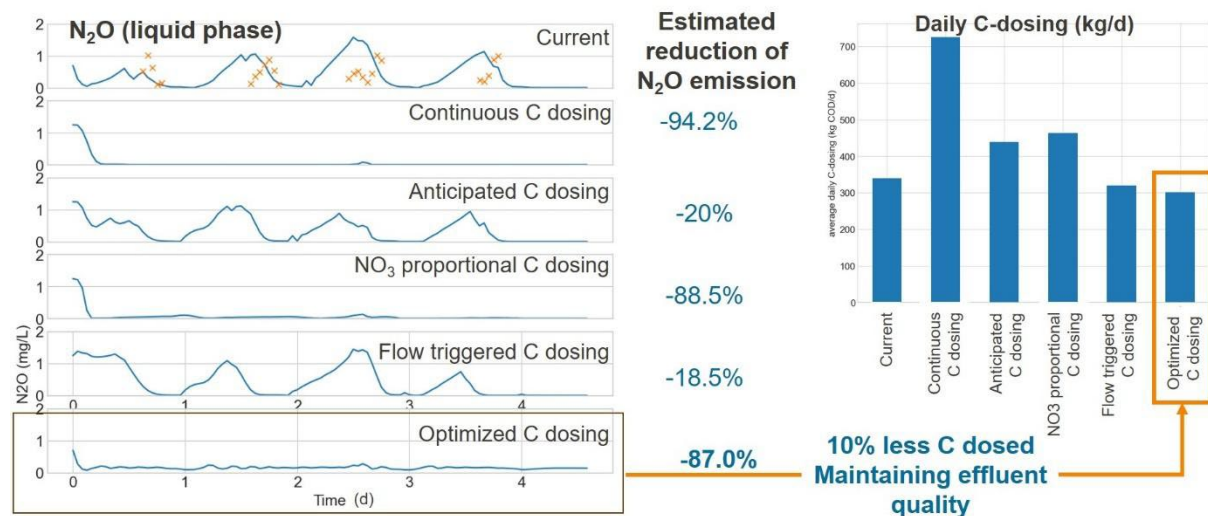


Abbildung 4: Reduktion der N₂O-Emissionen infolge angepasster C-Dosierstrategien und der daraus resultierende Verbrauch der C-Quelle. Das gewählte Szenario soll die Emissionen um 87 % und den C-Verbrauch um 10 % senken

Da auch andere Grundursachen zu den N₂O-Emissionen beitragen (siehe Abbildung 2), besteht zusätzliches Optimierungspotenzial in der weiteren Anpassung der Belüftungsregelung, insbesondere darin, niedrige DO-Werte (Belüftungszone 1 und erste Hälfte der Zone 2) und die DO-Rückführung (Ende der Zone 2) zu vermeiden. Für die Anpassung der C-Dosierung wurde jedoch der höchste ROI im Sinne der 3E-Optimierung (Emissions, Effluent, Efficiency) erwartet. Die Modellergebnisse untermauerten den Business Case für die Arbeiten vor Ort; zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Dokuments setzt Evides Industriewater die neue Dosierstrategie um.

Fazit und Wirkung

Evides Industriewater konnte die Grundursachen von N₂O genau benennen und dadurch gezielt handeln. Es wurden 3 wesentliche Grundursachen identifiziert, die zu lokalen Hotspots der N₂O-Bildung führen: 1) unerwünschte Rückführung von Sauerstoff aus der aeroben in die anoxische Zone, 2) sehr niedrige DO-Werte in den meisten aeroben Zonen und 3) Kohlenstofflimitierung. Letztere wurde als dominanter Pfad der N₂O-Bildung identifiziert.

Gemäß der virtuellen Erprobung der Minderungsstrategien wird erwartet, dass die Optimierung der bereits umgesetzten Kohlenstoffdosierung die N₂O-Emissionen um 87 % senkt und zusätzlich eine OpEx-Einsparung von 10 % des externen Kohlenstoffbedarfs bringt. Darüber hinaus soll sich die Ablaufqualität hinsichtlich der TN-Entfernung um 10–15 % verbessern.

Ohne die Modellerkenntnisse hätte Evides Industriewater diese Szenarien nicht vor Ort testen können; die Ergebnisse wurden genutzt, um den Business Case für die Arbeiten vor Ort zu untermauern. Die Umsetzung der Minderungsmaßnahmen läuft derzeit.

Veröffentlicht von:

AM-Team BV

Sint-Pietersnieuwstraat 11

9000 Gent (BE)

+32 480 64 70 76

info@am-team.com

www.am-team.com

Dokumentennummer: 2025CC001

Version: 1

Über AM-Team:

AM-Team bietet weltweit einzigartige Modellierungs- und Datendienste sowie Digital-Twin-Lösungen an, um kommunale und industrielle Wasser- und Abwasseraufbereitungsanlagen intelligent zu entwerfen, zu optimieren und zu digitalisieren. Das Unternehmen hat an mehr als 150 Standorten auf 4 Kontinenten gearbeitet. AM-Team arbeitet direkt mit Wasserunternehmen sowie mit Ingenieurbüros, Softwareunternehmen und Technologieanbietern zusammen.

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

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

© AM-Team 2025 Alle Rechte vorbehalten