



Lachgas-Emissionen auf kommunalen Kläranlagen des Ruhrverbands

Ronja Voß

15.11.2024

1

Hintergrund: N₂O-Emissionen auf Kläranlagen

2

N₂O-Messungen beim Ruhrverband

3

Ergebnisse auf der Kläranlage Bochum-Ölbachtal

4

Ergebnisse auf der Kläranlage Sundern

5

Maßnahmen zur Reduktion der N₂O-Emissionen

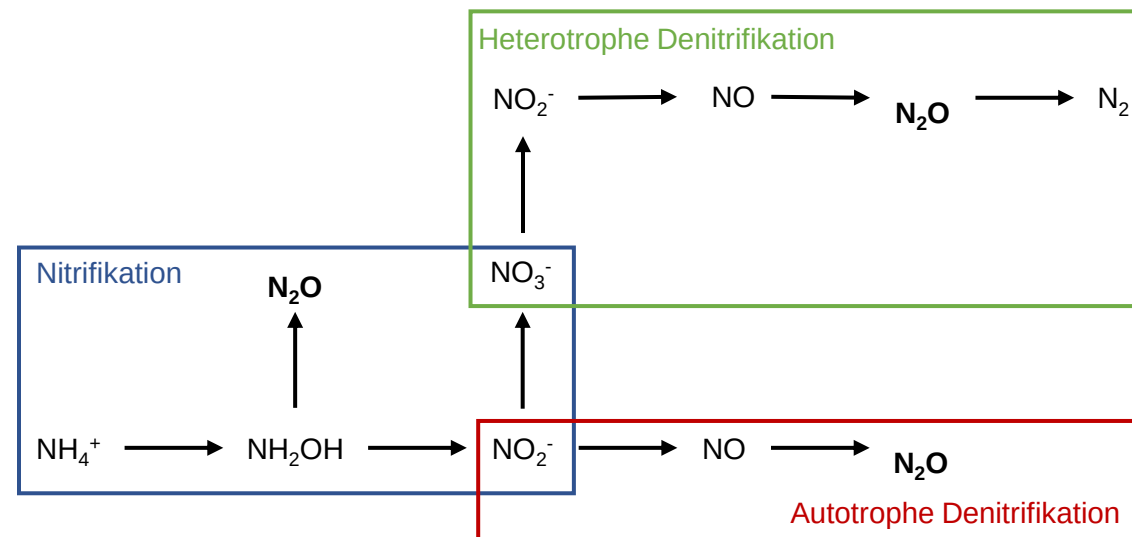
6

Digitaler Zwilling & Ausblick

N₂O-Emissionen auf Kläranlagen

Hintergrund

- Das Treibhausgaspotential von Lachgas (N₂O) ist sehr hoch: CO₂e = 273 (100 Jahre)
 - Auch kleinere Mengen sind relevant und sollten vermieden werden
- N₂O-Emissionen fallen zeitlich und räumlich dynamisch in der biologischen Stufe an
 - Resultat einer unvollständigen Nitrifikation / Denitrifikation
- N₂O-Bildung
 - Direkt an den Prozess der biologischen Stickstoffentfernung gekoppelt
 - N₂O wird nur unter bestimmten Prozessbedingungen gebildet
 - Regelbetrieb (vollständige N-Elimination):
N₂O-Emissionen liegen deutlich
1 % N₂O-N / N_{ges,Zulauf}



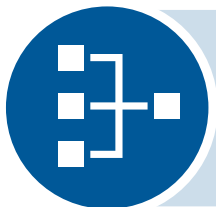
N₂O-Bildungswege (Beier 2015)

N₂O-Emissionen auf Kläranlagen

Bilanzierung und Entwicklung von Reduktionsmaßnahmen



Berechnung der N₂O-Emissionen über Emissionsfaktoren aus der Literatur führt häufig zu signifikanten Über- und Unterschätzungen



N₂O-Bildung wird von vielen verschiedenen Einflussfaktoren beeinflusst
➤ Keine einheitliche Reduktionsstrategie



Messungen sind für die Bestimmung eines validen N₂O-Emissionsfaktors, die Identifikation von Bildungswegen und die Entwicklung von Reduktionsstrategien essentiell



Kombination von KI und mechanistischem Modell für die Abschätzung der N₂O-Emissionen und die Entwicklung von Reduktionsstrategien

N₂O-Emissionen auf Kläranlagen

Einflussfaktoren

Kriterium	Erhöhte N ₂ O-Emissionen
Auslastung	Anschlussgröße > Ausbaugröße
Belüftungsregelung	Feste O ₂ -Sollwert Einstellung
Beschickung inkl. Schlammwasser	stoßartig
Schlammalter	(zeitweise) zu niedriges Schlammalter (vgl. DWA-A 131)
Konzentrationsgradient in der biologischen Stufe	Ausgeprägt (SBR, Pfropfenströmung, Kaskade)
Stickstoffelimination	≤ 90 %
Ammoniumumsatzrate	Erhöht (Co-Substrate, Industrieabwasser)
Nitrit-Akkumulation	> 0,3 µg/L NO ₂ -N/L
Zulaufschwankungen	ausgeprägt
CSB:N - Verhältnis	≤ 6

Auszug aus Arbeitsbericht DWA AG 6.7 "Standardisiertes Vorgehen zur Planung, Durchführung und Auswertung von N₂O-Emissionsmessungen" (KA 06/24)

Forschungsprojekt: KAbit

“Auf dem Weg zur kosteneffizienten, klimaneutralen und KI-gesteuerten Kläranlage der Zukunft”

- Messung von Lachgas-Emissionen (N_2O) auf Kläranlagen des Ruhrverband
 - Kontinuierlich: Flüssigphase (4 amperometrische Sensoren von Unisense A/S)
 - Messkampagne: Gasphase (FTIR; durchgeführt von LANUV)
- Ergebnisaufbereitung durch Kombination von KI und mechanistischem Modell (Okeanos & Ruhr University Bochum)
 - Messwertergänzung durch KI
 - Simulation durch mechanistisches Modell (erweitertes ASM3 Modell, implementiert in der Software SIMBA#)
 - Entwicklung eines N_2O Prognose-Tools
 - Entwicklung von N_2O Reduktionstrategien

Projekt-Partner



RUHR
UNIVERSITÄT
BOCHUM

RUB

Landesamt für Natur,
Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen



Förderung



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

N₂O-Messung

Kombination: Messung in der Flüssig- und Gasphase



Kontinuierliche Sensor-Messung (Unisense A/S) in der Flüssigphase



FTIR-Messung in der Gasphase, durchgeführt vom LANUV als Messkampagne



Kläranlage Bochum-Ölbachtal

Übersicht

Kläranlagen-Informationen

- Kommunale Kläranlage
- Ausbaukapazität = 293.100 EW

Zulaufbedingungen 2023 (Mittelwert)

- Zufluss: $Q = 794 \text{ l/s}$
- Konzentrationen:
 - CSB: 315 mg/L
 - N_{ges} : 41 mg/L
 - P_{ges} : 5,5 mg/L

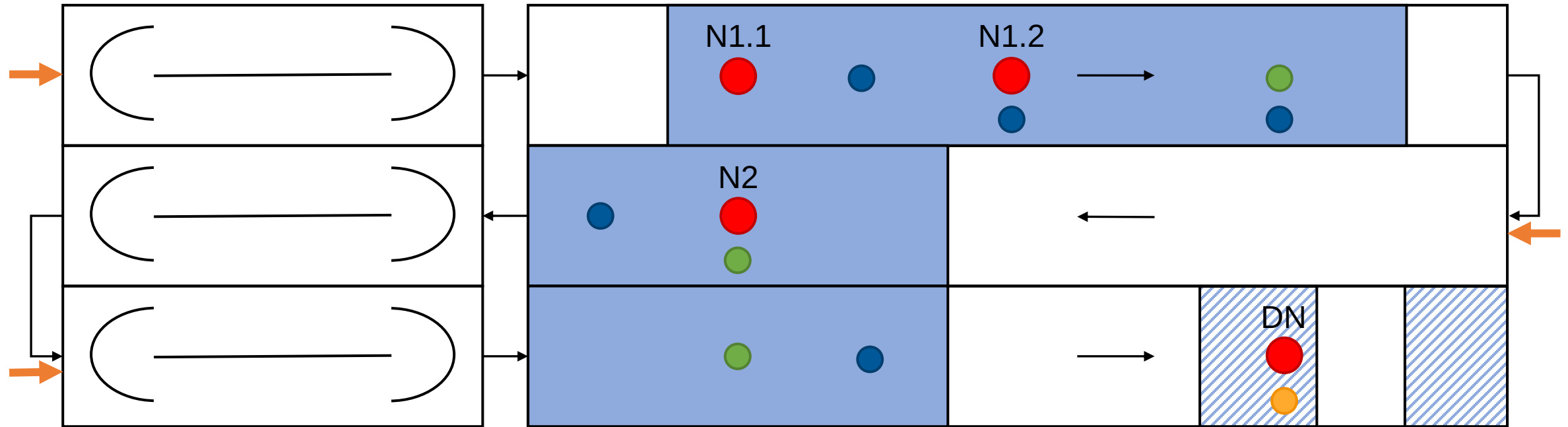


Biologische Reinigung

- 2 identische Straßen (Parallelbetrieb)
- Kaskaden-Denitrifikation
- Flexible Belüftungszonen, die individuell gesteuert werden können
- Belüftungssteuerung erfolgt über $\text{NH}_4\text{-N}$ Konzentration in jeder Kaskade
- Kontinuierliche Zugabe der C-Quelle in der 3. Kaskade – Regelung über $\text{NO}_3\text{-N}$

N₂O-Messung

Positionen der N₂O-Sensoren im Belebungsbecken



Messpunkte

- N₂O-N
- O₂
- NH₄-N
- NO₃-N



Zulauf



Fließrichtung



Belüftete Zonen



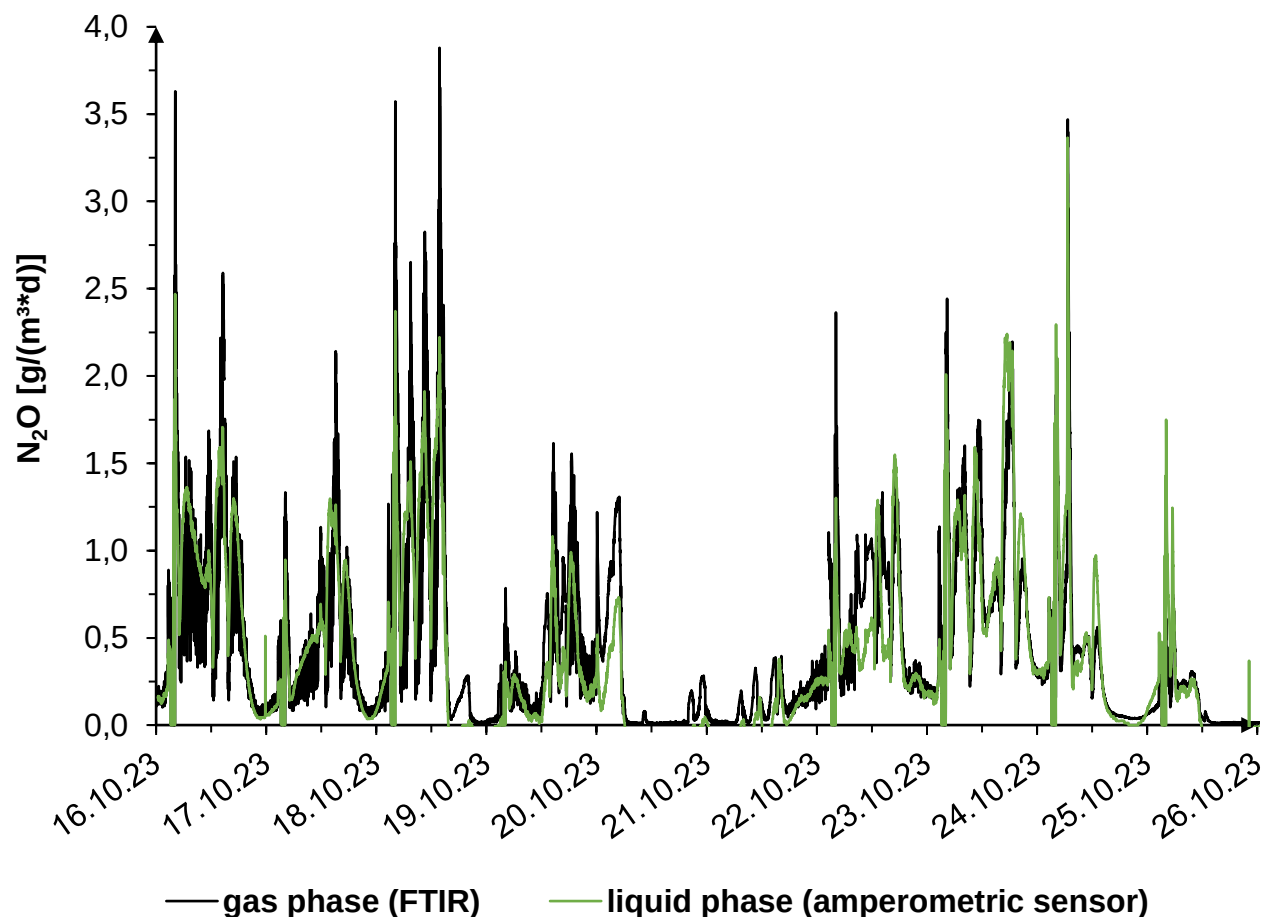
i.d.R. nicht belüftet (belüftet nach Bedarf)



N₂O-sensor (Unisense Environment)

Validierung der Emissionsberechnung

Direkte N₂O-Messung in der Gasphase ↔ Emissionsberechnung aus der Flüssigphase



N₂O-N Emissionsrate [g N₂O-N/(m³/d)]
(Schulthess & Gujer)

$$r_{N_2O-N} = H_{N_2O} \cdot c_{N_2O-N,l} \cdot \left(1 - e^{-\frac{k_L a_{N_2O} \cdot V_R}{H_{N_2O} \cdot Q_A}}\right) \cdot \frac{Q_A}{V_R}$$

N₂O Stoffübergangskoeffizient k_La [d⁻¹]
(Foley et al.)

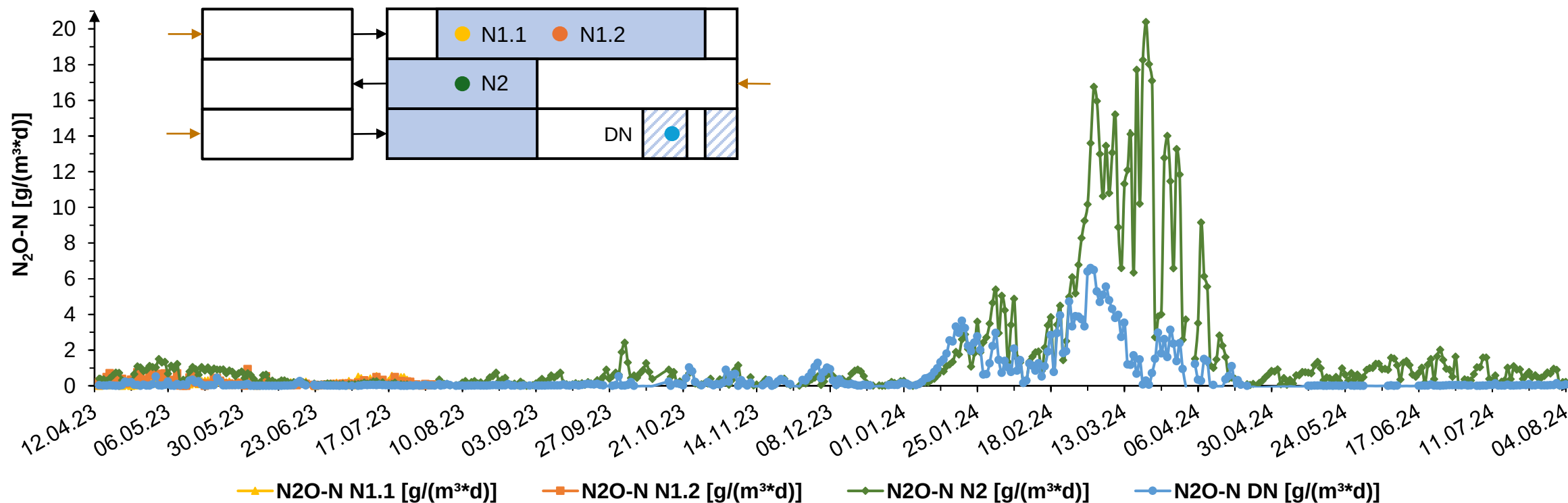
$$k_L a = \left[\left(\frac{H_B}{0.815} \right)^{-0.49} \cdot 34500 \cdot v_G^{0.86} \right] \cdot 1,024^{(T_B - 20)}$$

Zusätzliche Parameter

- Belüftung: Durchfluss
- Temperatur
- Beckenabmessungen

N₂O-Emissionen

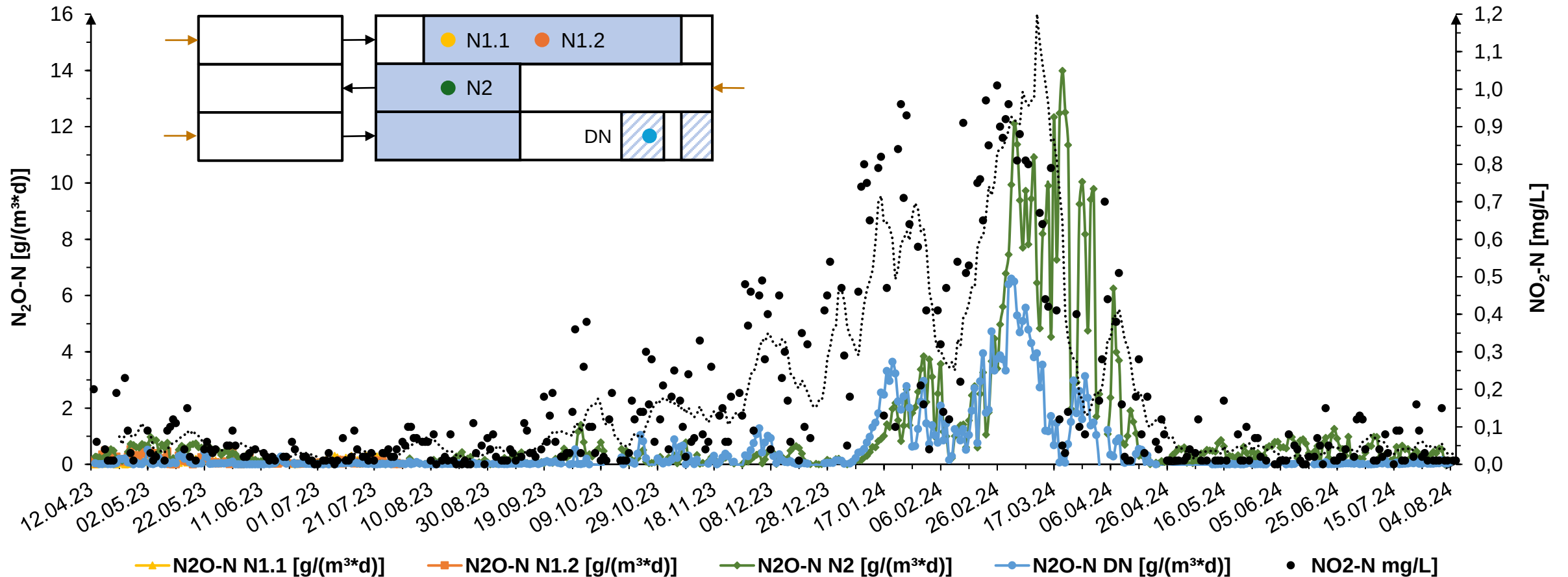
Jahresverlauf: Tagesmittelwerte



- Niedrige Emissionen in den Sommermonaten
- Signifikanter Anstieg der Emissionen von Januar bis April 2024
- N₂O wird in den belüfteten und unbelüfteten Zonen gebildet

N₂O-Emissionen

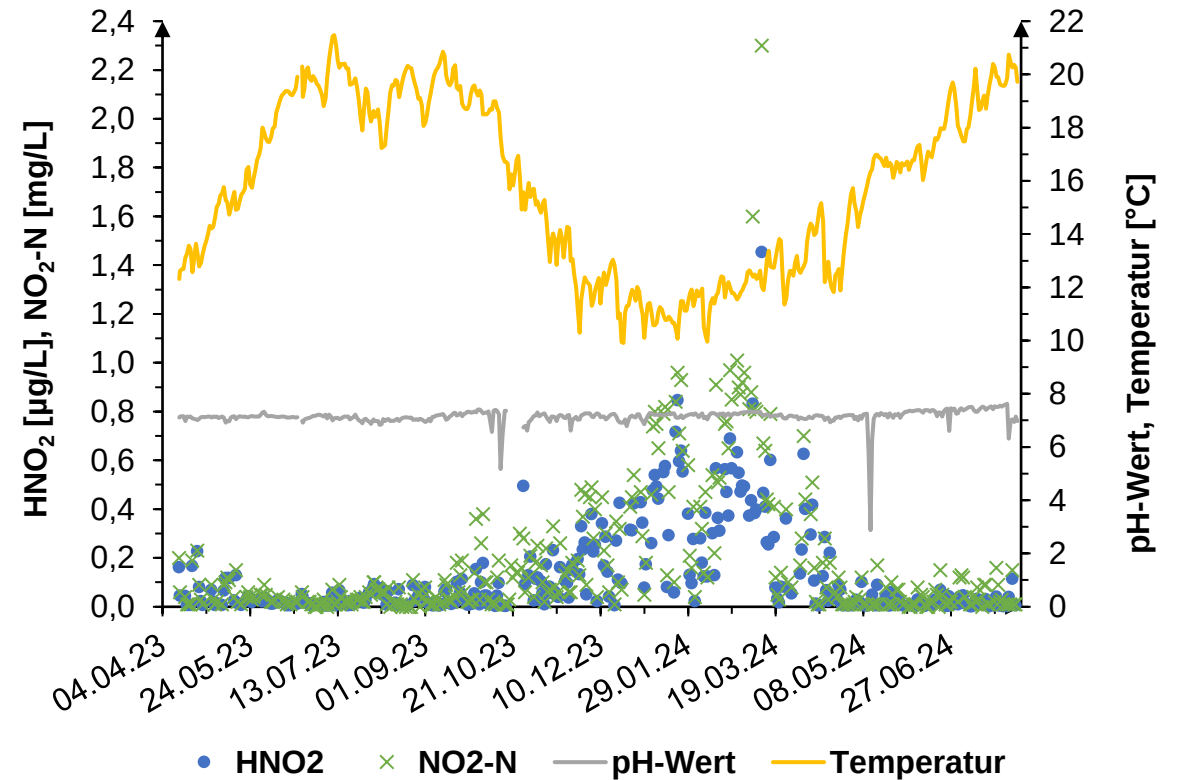
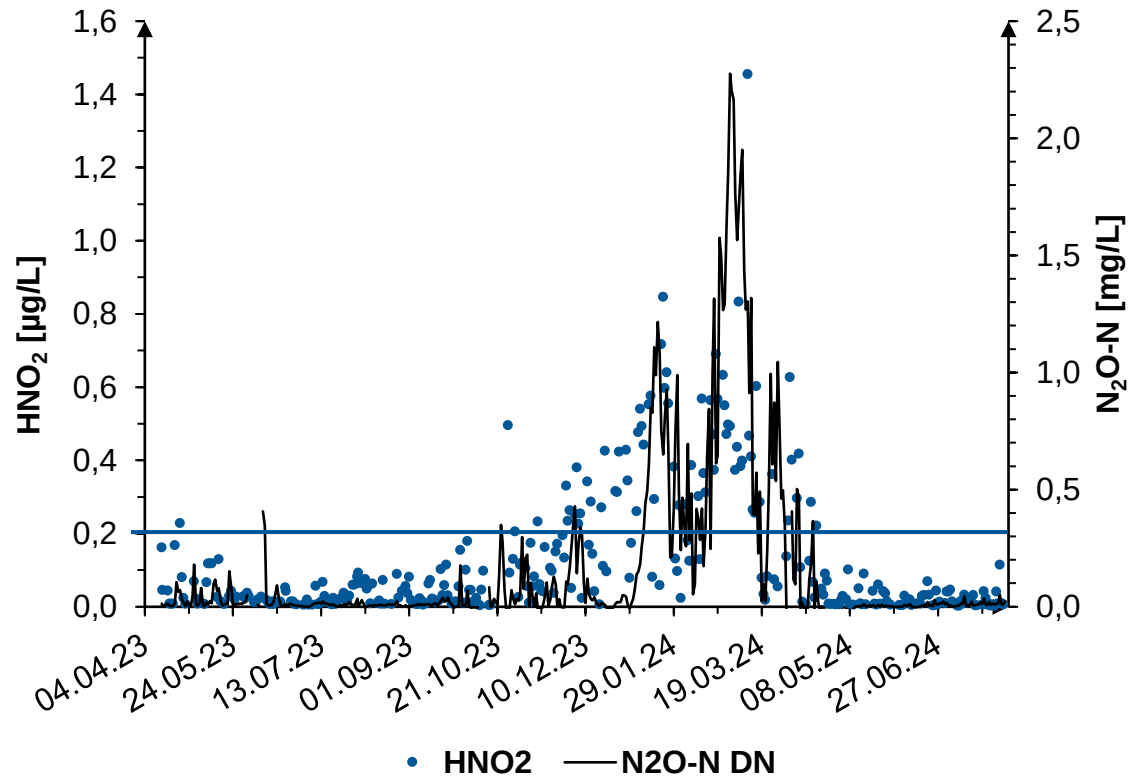
Korrelation: Nitrit-Konzentration (NO₂-N) im Ablauf der KA



- Korrelation zwischen der Nitrit-Konzentration (NO₂-N) im Ablauf und der N₂O-N Emissionen
- Keine Verschlechterung der Ablaufwerte (NH₄-N und NO₃-N)

Indirekte Hemmung von Nitrit in den Denitrifikationszonen

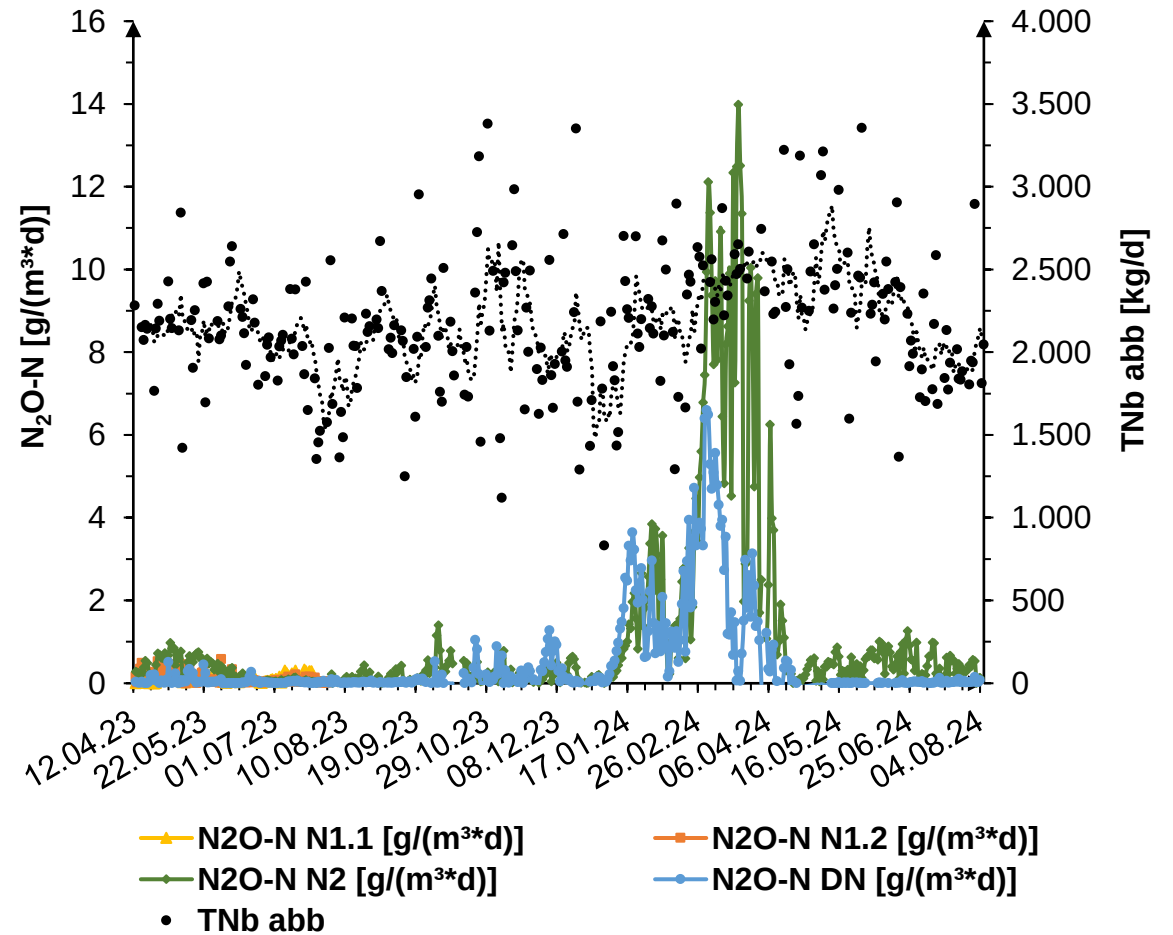
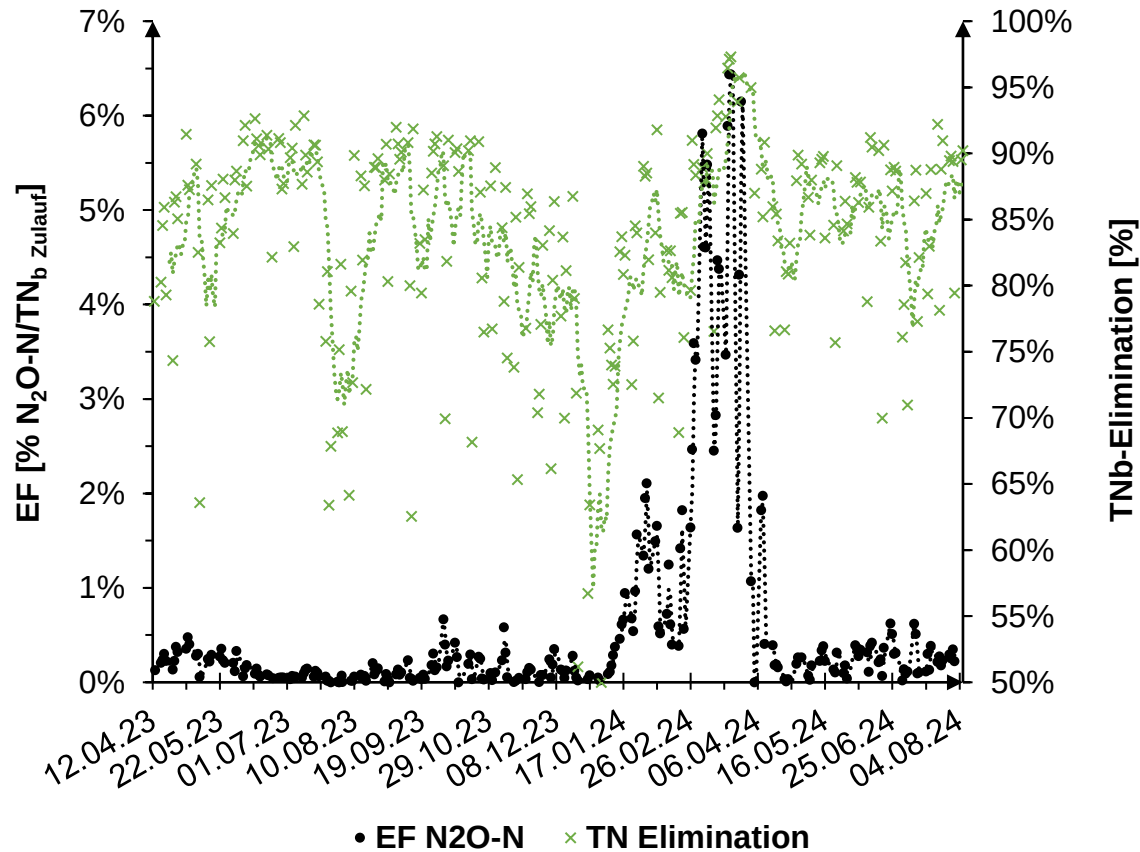
Dissoziationsgleichgewicht: $\text{NO}_2 \leftrightarrow \text{HNO}_2$



- Dissoziations-Gleichgewicht ist abhängig vom pH-Wert und der Temperatur
- HNO_2 hat eine hemmende Wirkung auf die N_2O -Reduktion
- $\text{HNO}_2 = 0,2 \mu\text{g/L} \rightarrow$ Akkumulation von N_2O

N₂O-Emissionen

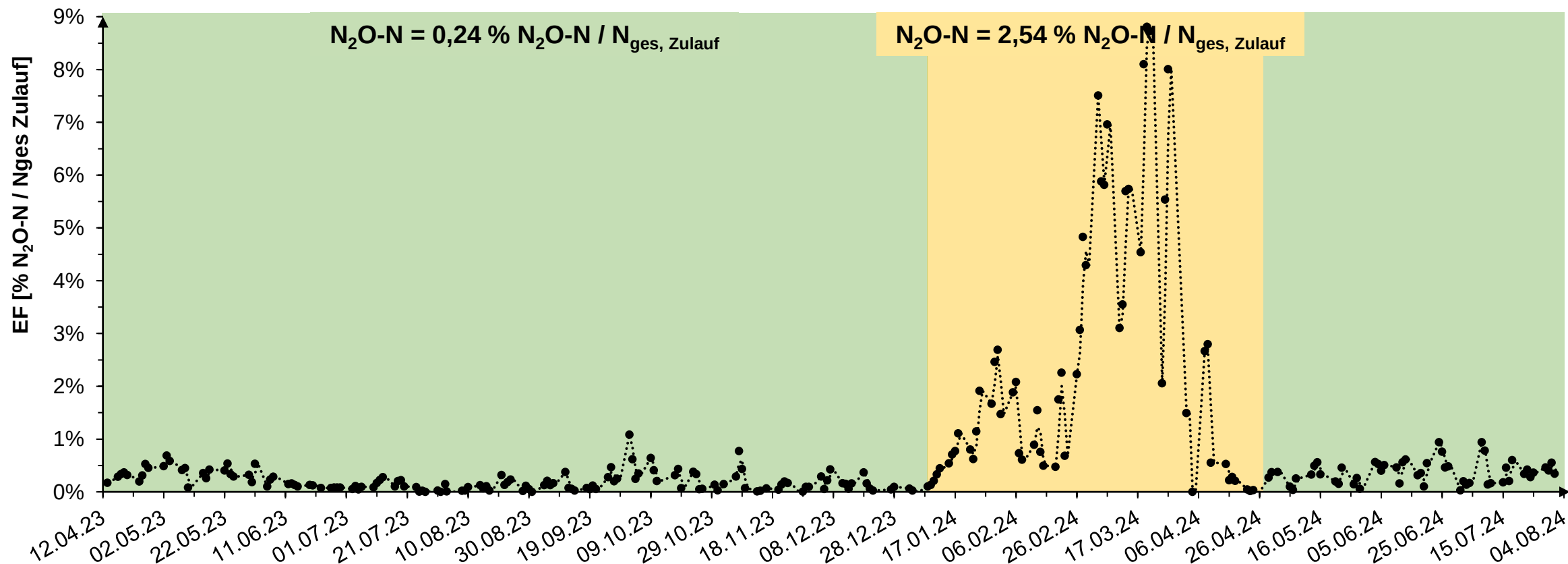
TN_b-Elimination / Abgebautes TN_b in der biologischen Reinigungsstufe



➤ Die Nitrit-Akkumulation hat einen größeren Einfluss auf die N₂O-Bildung als die TN_b Elimination

N₂O-N Emissionsfaktor: Saisonaler Verlauf

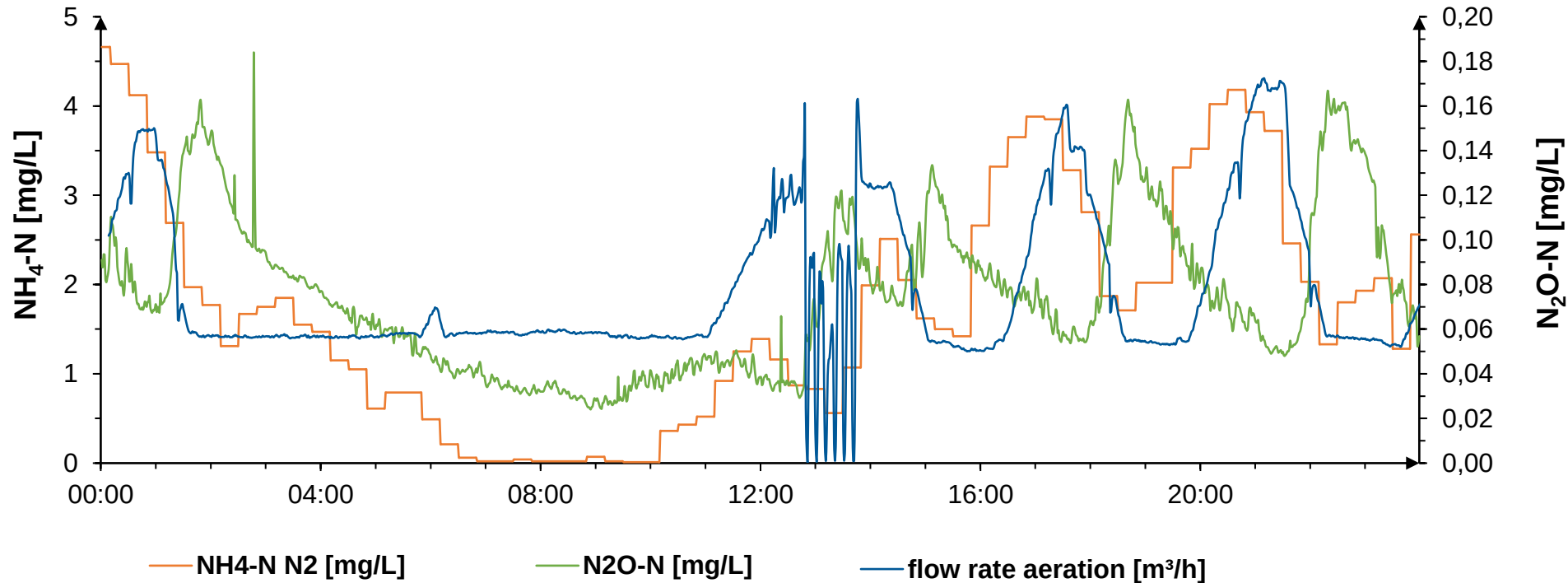
Tagesmittelwert des Belebungsbeckens



- EF Jahresmittelwert: **N₂O-N = 0,88 % N₂O-N / N_{ges, Zulauf}**
- EF Literatur: N₂O-N 0,39 % N₂O-N / N_{ges, Zulauf} (Stufenansatz - Paraviccini et al. 2015)

Normale Bedingungen: Nitrifikationsprozess

Tagesgang: N_2O -N, NH_4 -N, Durchflussrate (Belüftung)



- Normale Bedingungen: Korrelation zwischen TN-Elimination and N_2O -Emission
 - Korrelation zwischen den Tagesgängen von $\text{NH}_4\text{-N}$ & $\text{N}_2\text{O-N}$
- Belüftung führt zu einer Strippung von N_2O aus der Flüssigphase in die Atmosphäre
 - Abfall der $\text{N}_2\text{O-N}$ Konzentration in der Flüssigphase

Kläranlage Sundern

Übersicht

Kläranlagen-Informationen

- Kommunale Kläranlage
- Ausbaukapazität = 40.000 EW

Zulaufbedingungen 2023 (Mittelwert)

- Zufluss: $Q = 362 \text{ l/s}$
- Konzentrationen:
 - CSB: 84 mg/L
 - N_{ges} : 16 mg/L
 - P_{ges} : 1,6 mg/L

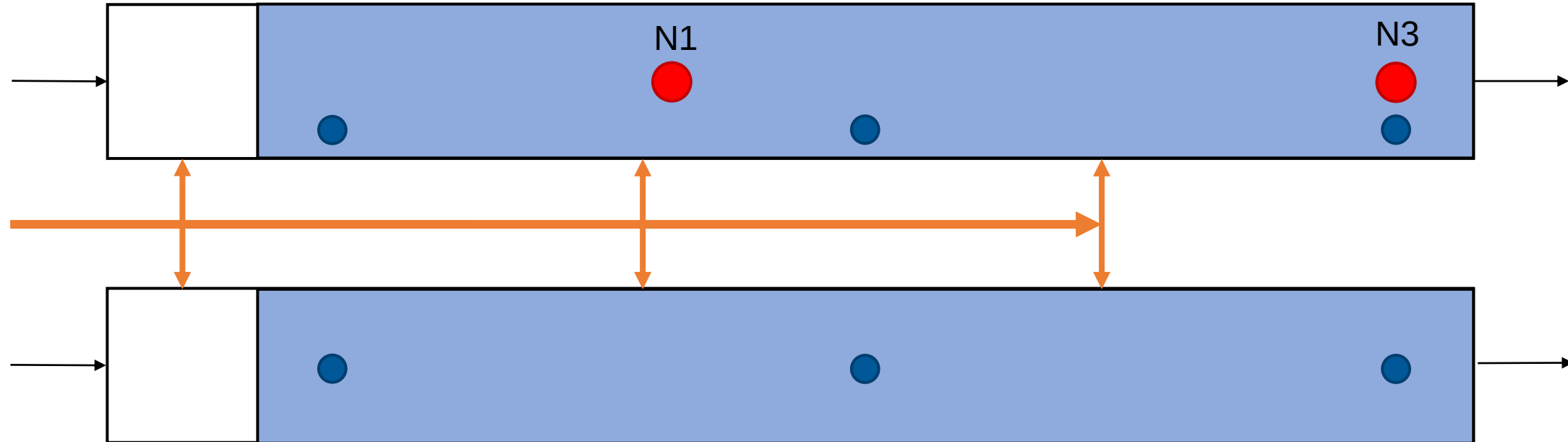


Biologische Reinigung

- 2 identische Straßen (Parallelbetrieb)
- Vorgeschaltete Denitrifikation
- Intermittierende Belüftung (feste O_2 -Sollwertvorgabe)

N₂O-Messung

Positionen der N₂O-Sensoren im Belebungsbecken



Messpunkte

● N₂O-N

● O₂

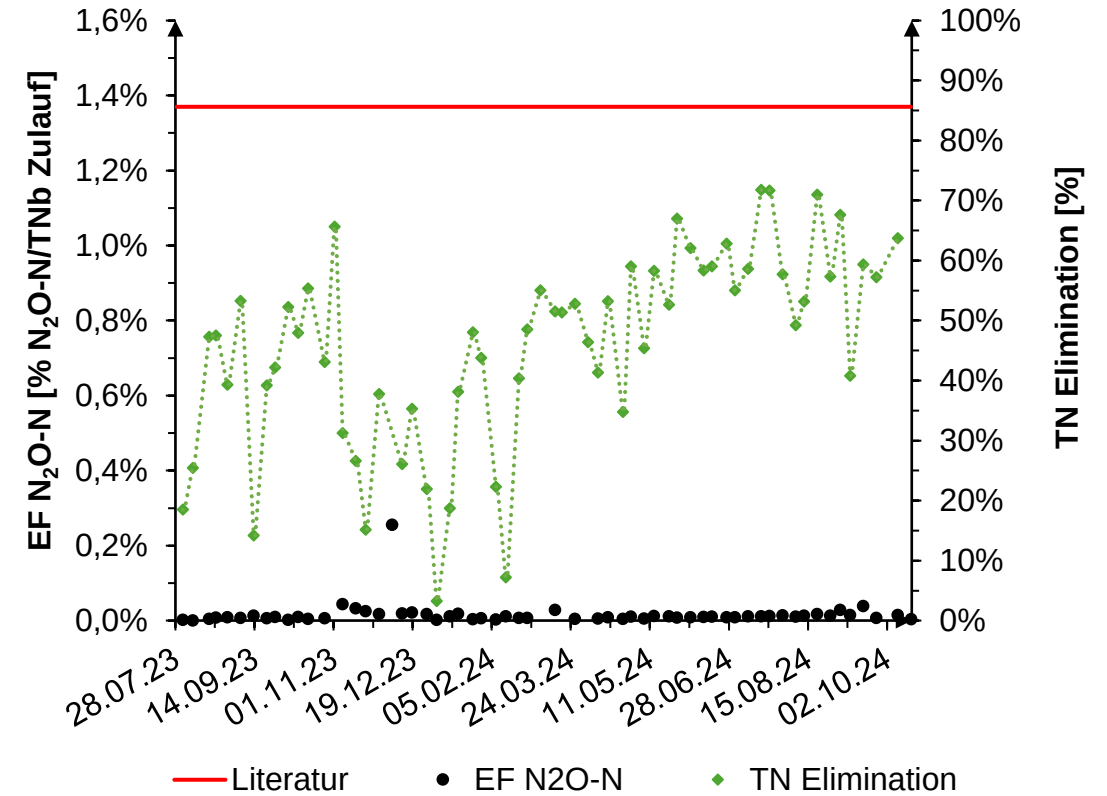
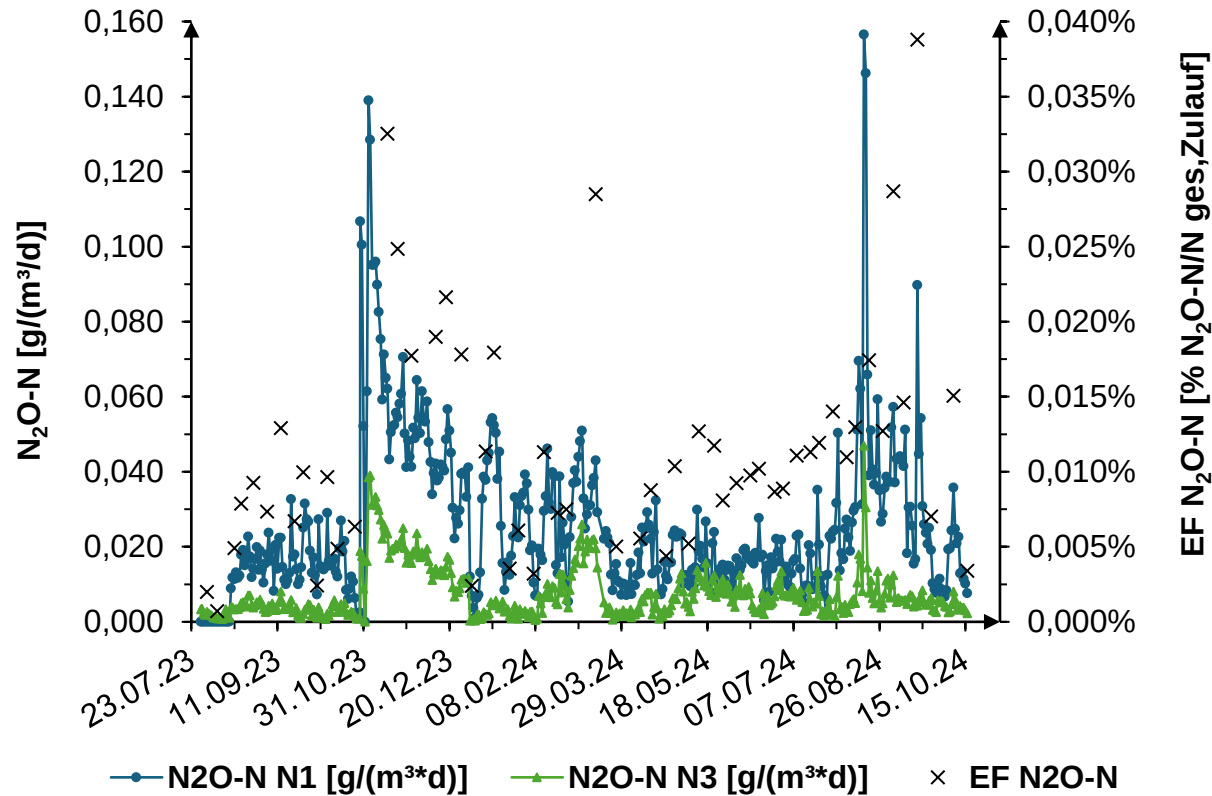
→ Zulauf

→ Fließrichtung

■ Belüftete Zonen

N₂O-Emissionen

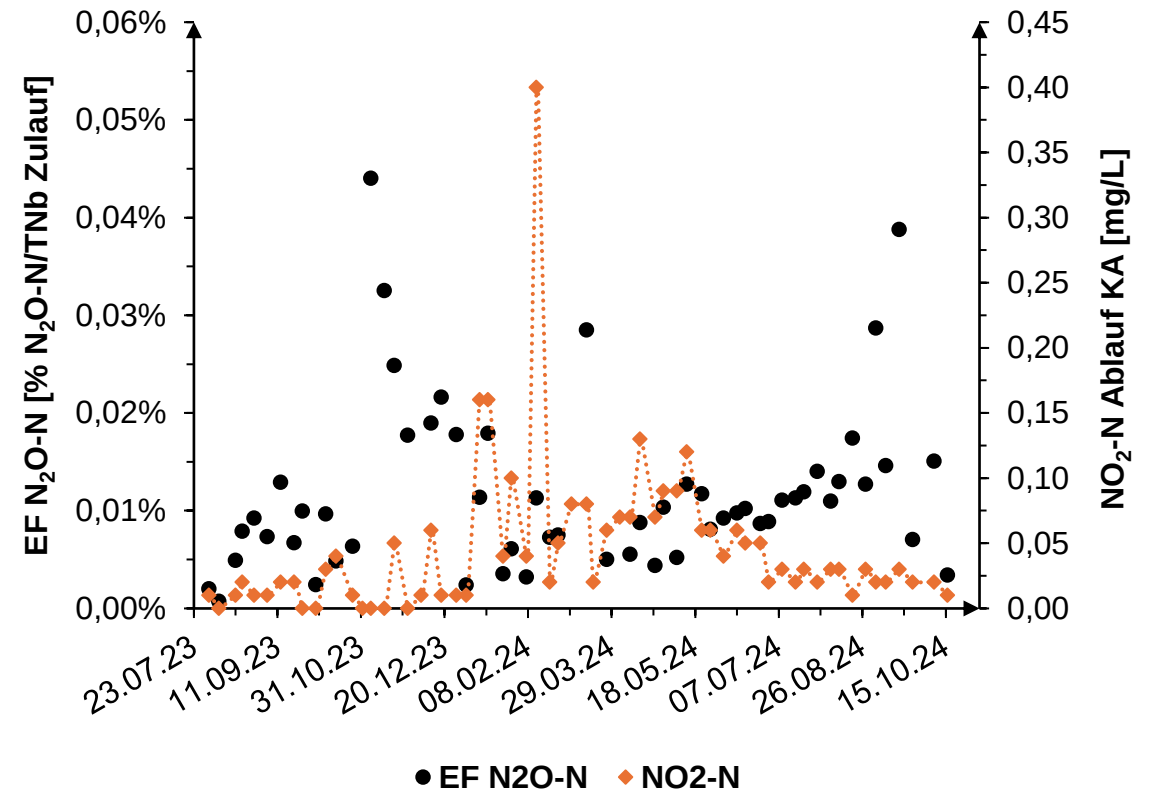
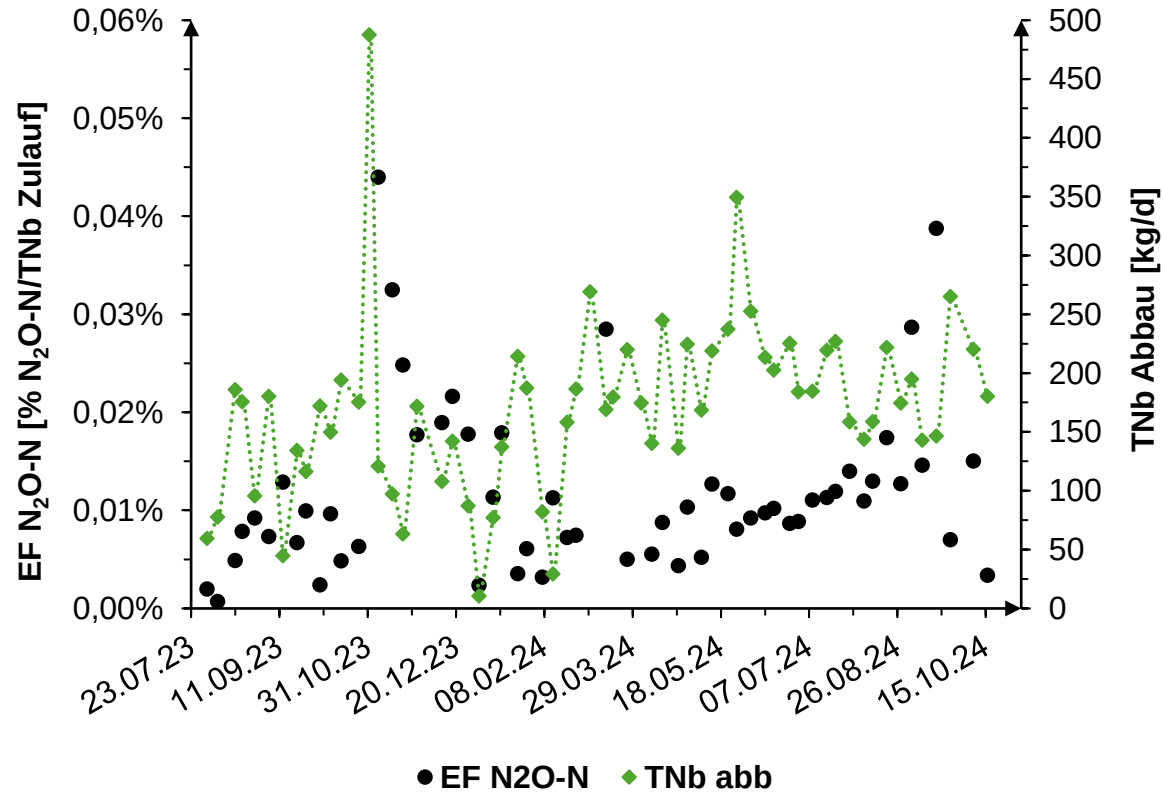
Emissionsfaktoren & Verlauf über Belebungsbecken



- EF Mittelwert = **0,016 % N₂O-N / N_{ges, Zulauf}**
- EF Literatur = **1,37 % N₂O-N / N_{ges, Zulauf}**

N₂O-Emissionen

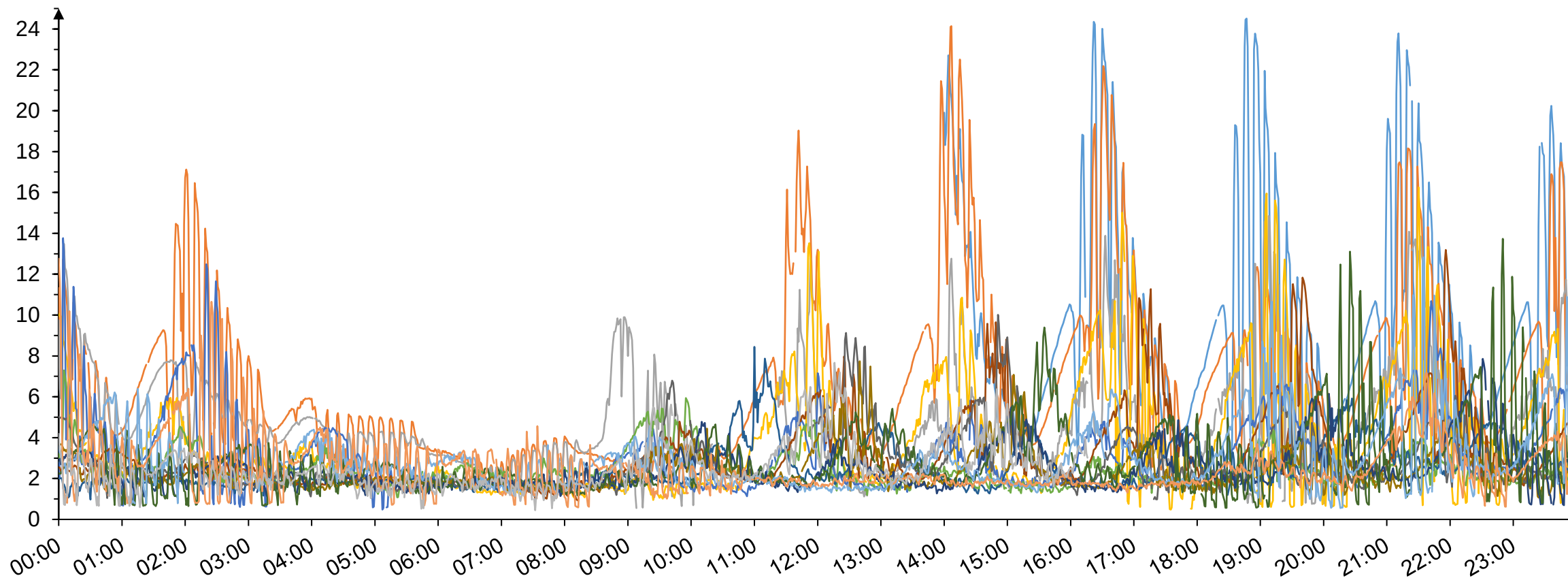
Korrelation



- Keine klare Korrelation zu erkennen
- Abgebaute TNb-Fracht hat größeren Einfluss als die Nitrit-Konzentration

N₂O-Konzentration (FTIR)

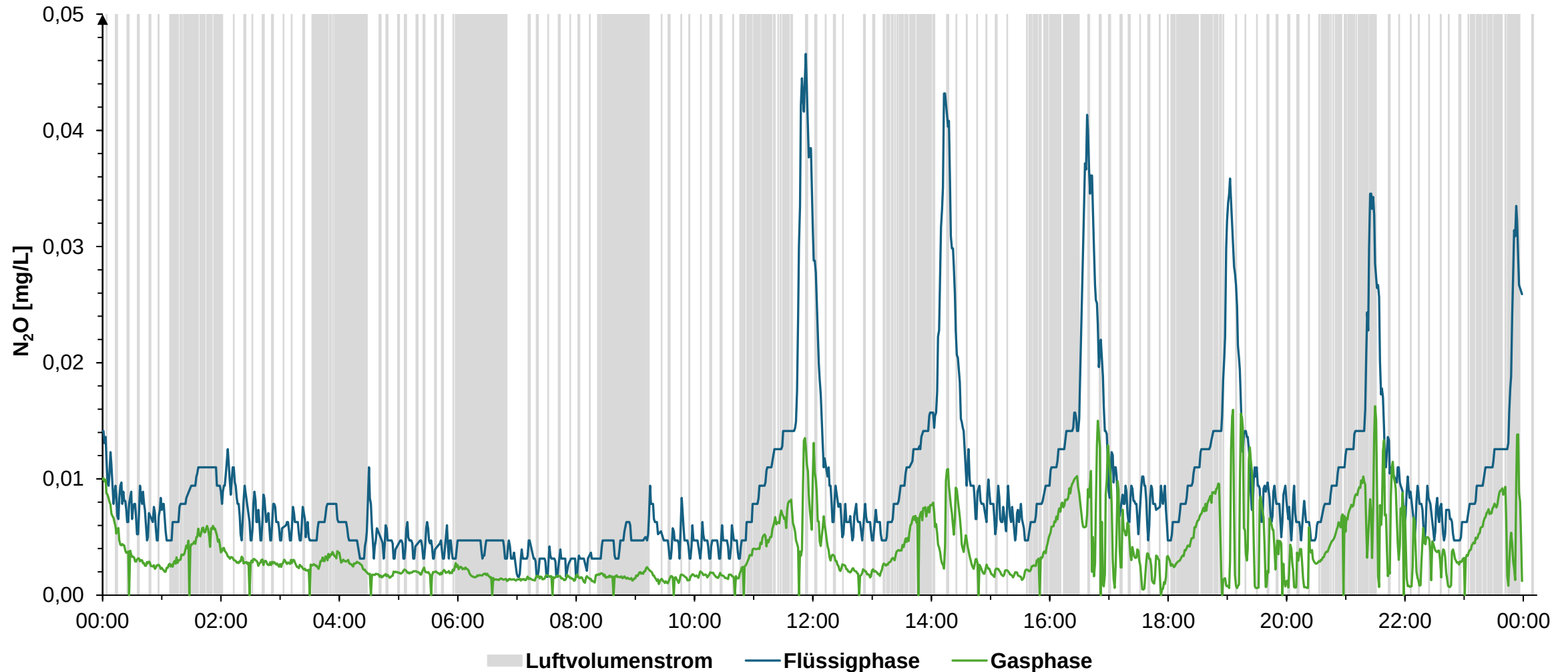
Tagesgang - Minutenmittelwerte



Messzeitraum: 19.03.2024 – 04.04.2024

Tagesgang: N₂O-Konzentration

Vergleich Flüssigphase ↔ Gasphase



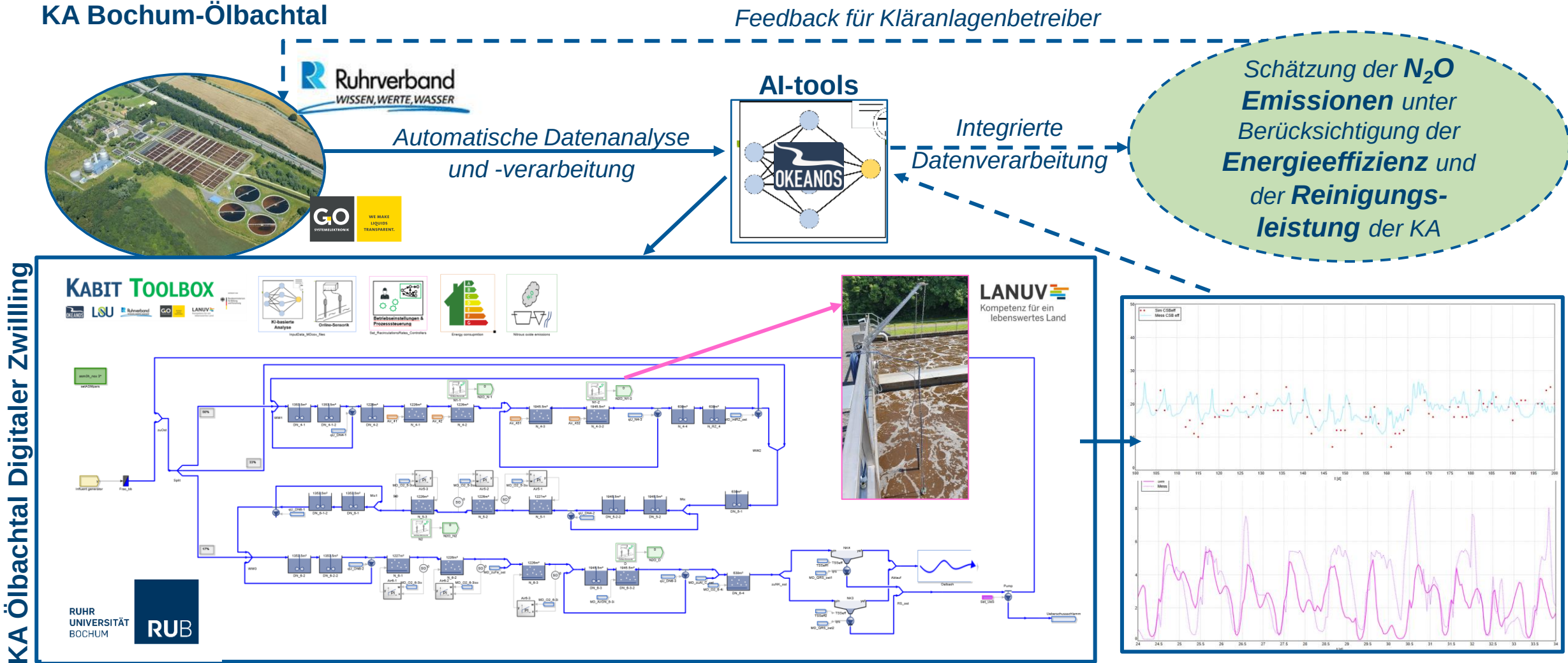
Biologische Maßnahmen zur Reduktion

Übersicht

- **Ausreichendes Nitrifikationsvolumen, um die Bildung von N_2O zu reduzieren**
 - Hohes aerobes Schlammalter
- **Ausreichendes Denitrifikationsvolumen für den Abbau von N_2O**
- **Variable Belüftungszonen, die bei Bedarf zu- und abgeschaltet werden können**
 - Belüftetes Volumen wird an die Belastung angepasst
 - Nur so lange belüften wie notwendig, um Denitrifikationskapazität zu erhöhen
 - Flexible Strategie: Simultane Denitrifikation (bei ausreichender CSB-Verfügbarkeit)
- **Vergleichmäßigung der Zulaufkraft**
 - Kontinuierliche Zugabe von stark N-haltigen Prozesswasser und wenn möglich von Industrieabwässern
 - Ausgleichsbehälter, um Frachtschläge abzufangen
- Bei Einsatz von **C-Quelle**: kontinuierliche Zugabe (Art der Quelle irrelevant)

Kombinierter Ansatz: KI und Mechanistisches Modell

Ruhr-Universität Bochum und Okeanos





N₂O-Ergebnisse

Bochum-Ölbachtal

- Großteil des Jahres:
Geringe N₂O-Emissionen
- NO₂-Akkumulation
verursacht N₂O-Peaks

Sundern

- Sehr geringe N₂O-
Emissionen



Reduktionsmaßnahmen

- Nitrit-Messungen als
Frühwarnsystem –
Ergänzende
Strichprobenmessungen
- Fortführen der Zugabe von
Kohlenstoffquellen wenn
NO₃-N Ablaufwerte niedrig
- Möglich: Hinzugeben von
Flockungshilfsmitteln, um
Verlust von NOB zu
verhindern



Ausblick

- Einsatz von digitalem
Zwilling: Entwicklung von
Betriebsstrategien (N₂O-
armer Betrieb)
- Umsetzung von
Maßnahmen zur
Emissionsminimierung
- N₂O-Messungen auf
weiteren Kläranlagen des
Ruhrverbandes

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Ronja Voß
rvo@ruhrverband.de
+49 201 178 2532