Dynamische Regelung für Gesamtoptimierung von Nitrifikation, Denitrifikation und N_2O Emissionen

Daniel Braun, Luzia von Känel, Lucien Biolley

GV VARA, 15. März 2023

Herausforderungen für die Abwasserreinigung in den kommenden 10 Jahren

- BAFU: Erhöhung der Stickstoffelimination auf 70 -80%.
  - Durchschnitt der schweizerischen ARA heute: 50 – 55%
  - Durchschnitt Deutschland heute 75 – 80%
- Reduktion Lachgasemissionen auf Emissionsfaktor < 0.4%.
  - Heute Emissionsfaktor 1.8% entspricht 1 – 1.5% des schweizerischen Treibhausgases!
- Reduktion von Verringerung von Nitritemissionen
- Reduktion von Energieverbrauch
- Elimination der Mikroverunreinigungen

Infrawatt Inovationspreis 2021 für Optimerung ARA Hofen mit dem Konzept der Dynamischen Regelung für ARA

Eckdaten der ARA:

Volumen der biologischen Strassen: 9000 m^3

Einwohnerwert (85% Quantil): 87’000 EW

Einwohnerwert (50% Quantil): 78’000 EW

Resultat der Optimierung:

Spezifisches Volumen Biologie: 103 L/EW (85% Quantil)

Energieverbrauch Belüftung: 11.4 kWh/(a*EW) (50% Quantil)

Eigendeckungsgrad Strom (ohne Kovergärung): 130% (vorh. 70%)

Denitrifikation: 70 - 75% (vorher 35%)

Emissionsfaktor N_2O: 0.2% (vorher 1.5-2%)

Abb. 1: (v. l. n. r.): Filippo Lombardi (Präsident InfraWatt), Hanspeter Bauer (Leiter Abwasserbetriebe der Entsorgung St. Gallen), Daniel Braun (ETH Zürich, Labor für Umweltingenieurwissenschaften), Heinz Habegger (Präsident, Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute VSA). (Foto: InfraWatt, Fabrice Nobs)

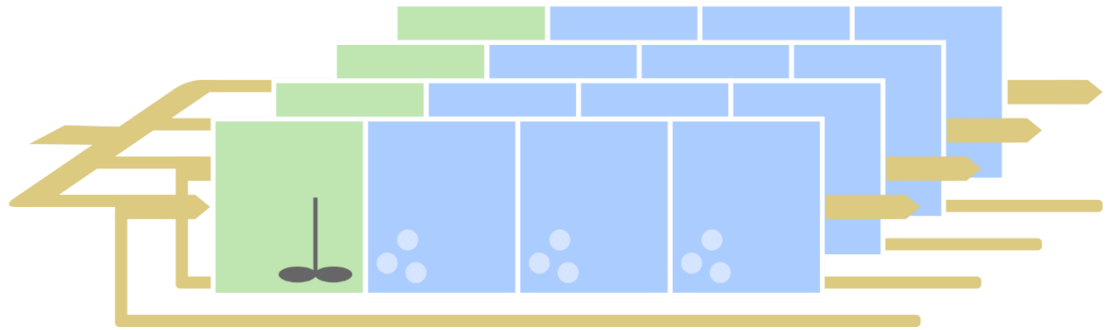
Dynamische Regelung von ARA: ein komplexes Problem

Variabler Input

- *Tagesgang*
- *Wochengang*
- *Jahresgang*
- *Temperatur*
- *Regenereignisse*
- *Industrie*
- *Havarien*
- *...*

Optimierungsparameter

- *Lastverteilung in ARA*
- *Hydraulik, Durchmischung*
- *Belüftung*
- *Faulwassermanagement*
- *Schlammalter*
- *Rücklaufschlamm*
- *Interne Rezirkulationen*
- *Betriebsmitteleinsatz*
- *Netzmanagement*
- *...*



Optimierungsziele

- *Betriebssicherheit*
- *Abbau organische Stoffe*
- *Nitrifikation*
- *Denitrifikation*
- *Phosphor-Reduktion*
- *Nitrit-Reduktion*
- *Energieverbrauch*
- *Lachgas-Reduktion*
- *Betriebsmitteleinsatz*
- *Mikroverunreinigungen*
- *...*

Ziel der dynamischen Regelung von ARA ist die Optimierungsparameter zeitlich so nachzuregeln, dass die Optimierungsziele möglichst alle gleichzeitig erfüllt werden können.
Dabei zeigt es sich, dass die Belüftungsregelung eine zentrale Rolle spielt!

Was wird bei der dynamischen Regelung automatisiert

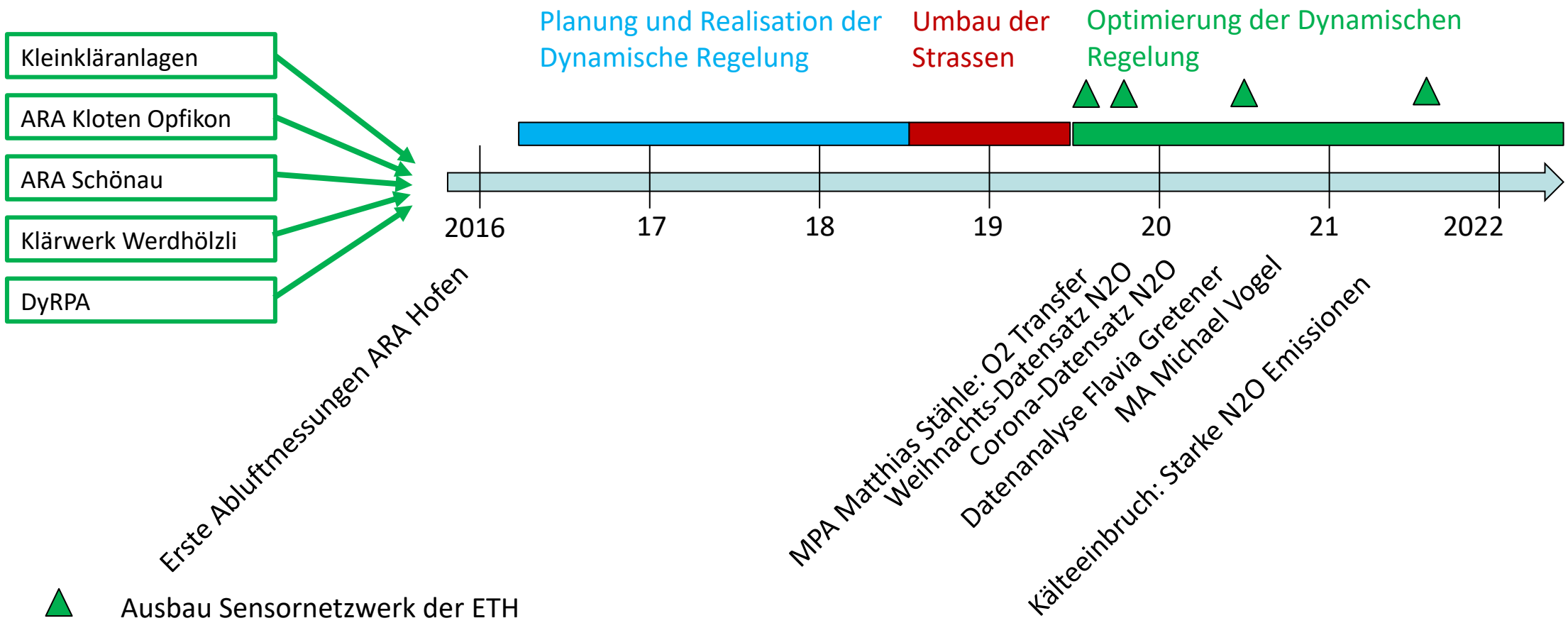
Um trotz variierendem Input möglichst viele Optimierungsziele zu erfüllen, können ARA **dynamisch** betrieben werden

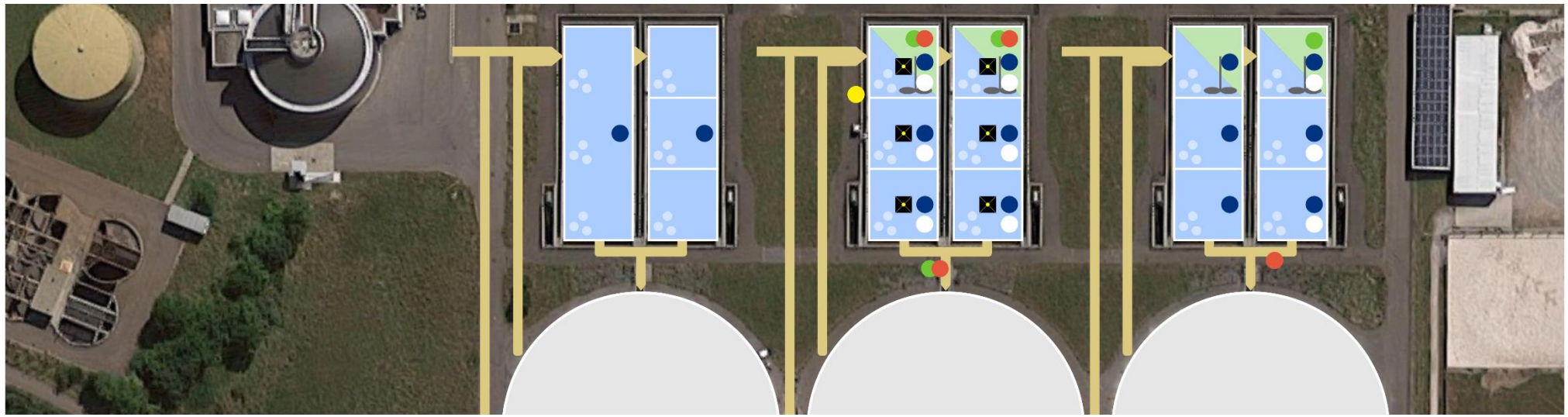
Zur Verfügung stehende hauptsächlich die folgenden Freiheitsgrade (konventionelle Anlagen):

- **Bivalente Zonen**
- **Sauerstoffsollwerte**
- **Rückführungen**

- **Faulwasserdosierung**
- **In Zukunft: leichtabbaubares Substrat?**

ARA Hofen: Der Weg zum InfraWatt Innovationspreis 2021

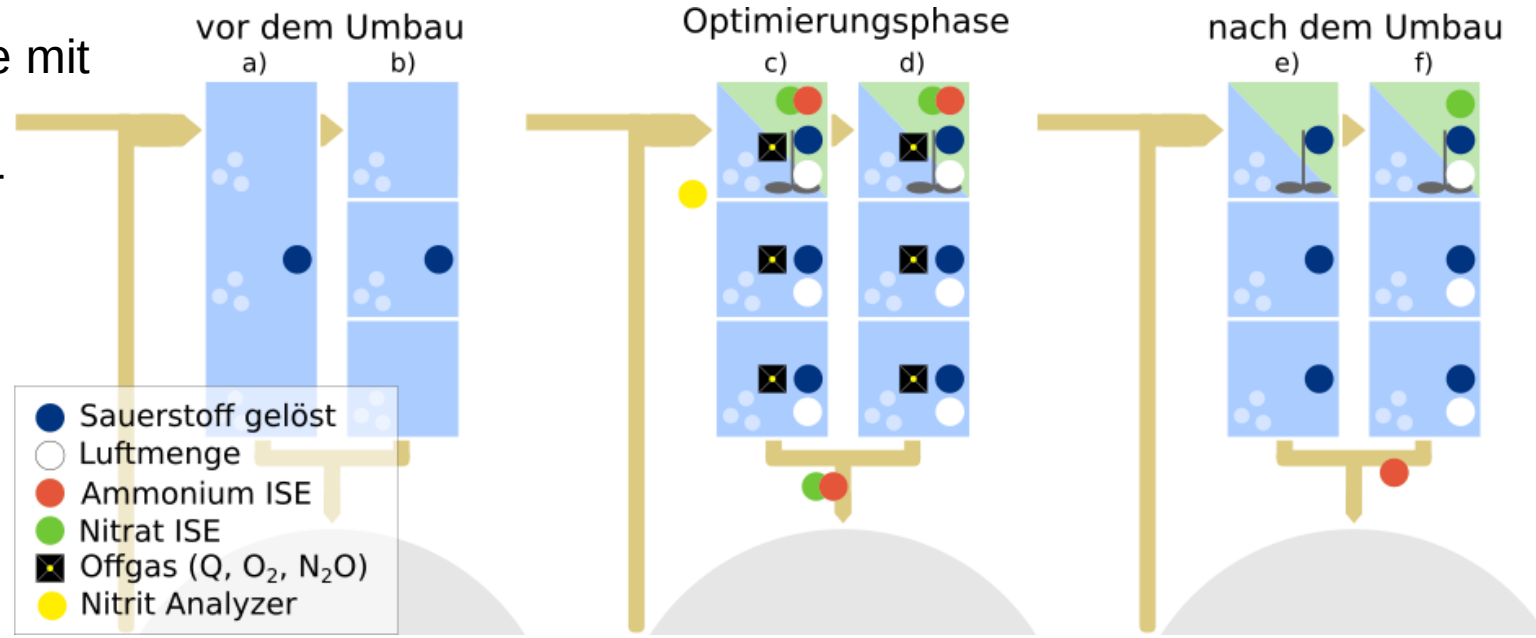




Ausbau ARA Hofen für dynamische Regelung

Ausbau der ARA Hofen für die dynamische Regelung. Sensornetzwerk für die Prozessoptimeirung betrieben durch ETH

- Ersatz der Drehkolbengebläse mit Turbo-Verdichter.
- Konsequente Unterteilung der Strassen in drei Zonen mit eigenständiger O2-Regelung.
- Konstantdruckregler zur Vermeidung von gekoppelten Regelkreisen.
- 1. Zone wird mit Rührer ausgerüstet.
- Einbau von Messstrecken für Luftmengenmessung.



- a + b: Ausrüstung vor dem Ausbau.
- c + d: Sensornetzwerk betrieben durch die ETH für die Prozessoptimierung.
- e: aktuelle Ausrüstung ohne Sensornetzwerk
- f: Vorschlag für Ausrüstung nach Abschluss der Prozessoptimierung.

Umsetzung der dynamischen Regelung

Softsensoren:	*Status Biologie*	*Status Netz*
ARA Hofen:	Schieberstellung in der hintersten Zone	Durchflussmessung im Kanalnetz

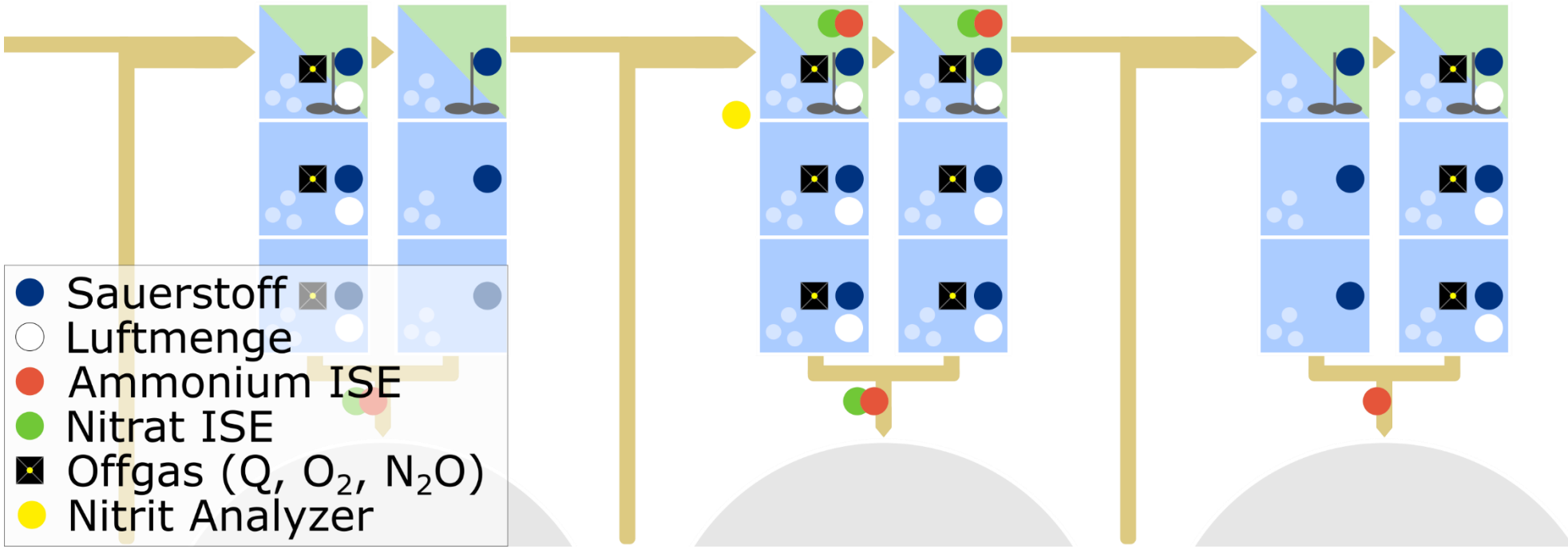
definiert

Betriebsmodus: *Tief- / Mittel- / Hochlast* *Vorbereitung Regen (1h)*

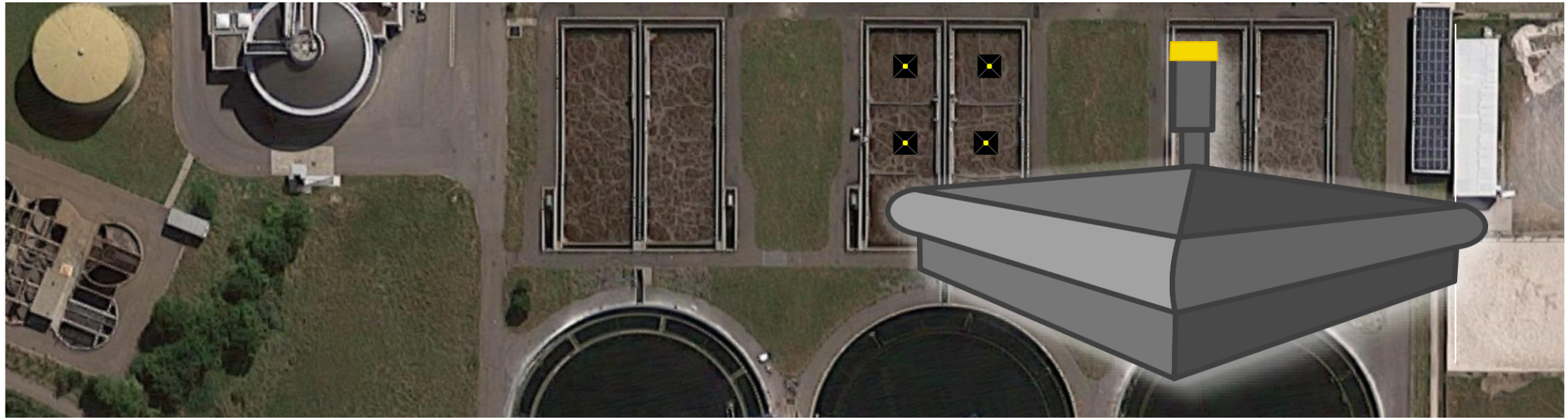
definiert

Betriebsweise:	Rührer	Sauerstoffkonzentration (mg/L)			Faulwasser-dosierung
	Zone 1	Zone 1	Zone 2	Zone3	
Tieflast	ein	0	1	2	möglich
Mittellast	aus	0.5	1.5	2	möglich
Hochlast	aus	1.5	2	2.5	verriegelt
Vorbereitung Regen	aus	1	2	2.5	verriegelt
Dauerbelüftung	aus	1	2	2.5	verriegelt

Aktueller Stand Sensornetzwerk für Prozessüberwachung



- Datenauswertung und Betrieb des Sensornetzwerkes durch ETH Zürich mit Unterstützung der ARA Hofen.
- Mit der Software SeNARA können wir die Betriebsdaten und die Daten des Sensornetzwerks überlagern und gemeinsam auswerten
- Das Sensornetzwerk wurde mehrmals während der Optimierungsphase ausgebaut.



Abluftmessung: Sauerstofftransfer und Lachgasemissionen

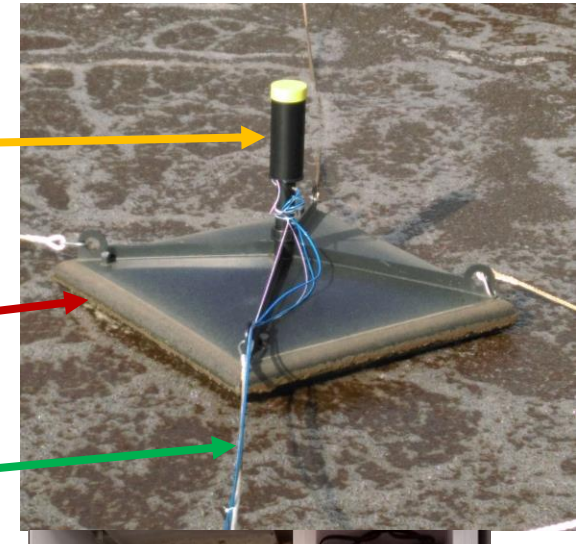
Abluftmesstechnik

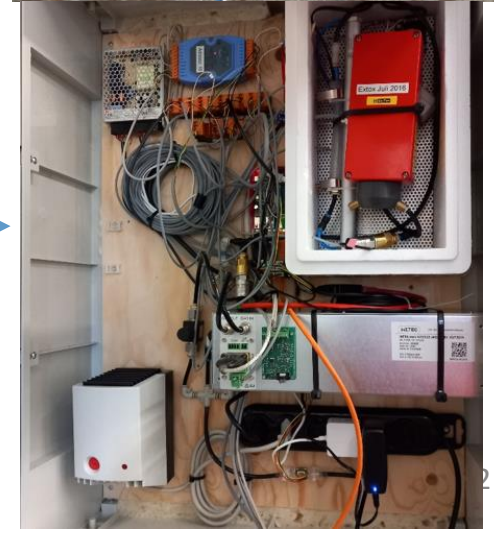
Luftdurchflussmessrohr:
- Durchfluss
- Feuchtigkeit
- Temperatur

Haube zum Auffangen von Abluft

Leitung zur Abluftmessung

Zyklische Messung von Abluft
- Es können bis 14 Hauben gemessen werden
- **3 verschiedene Messausbauvarianten**, je nach Fragestellung



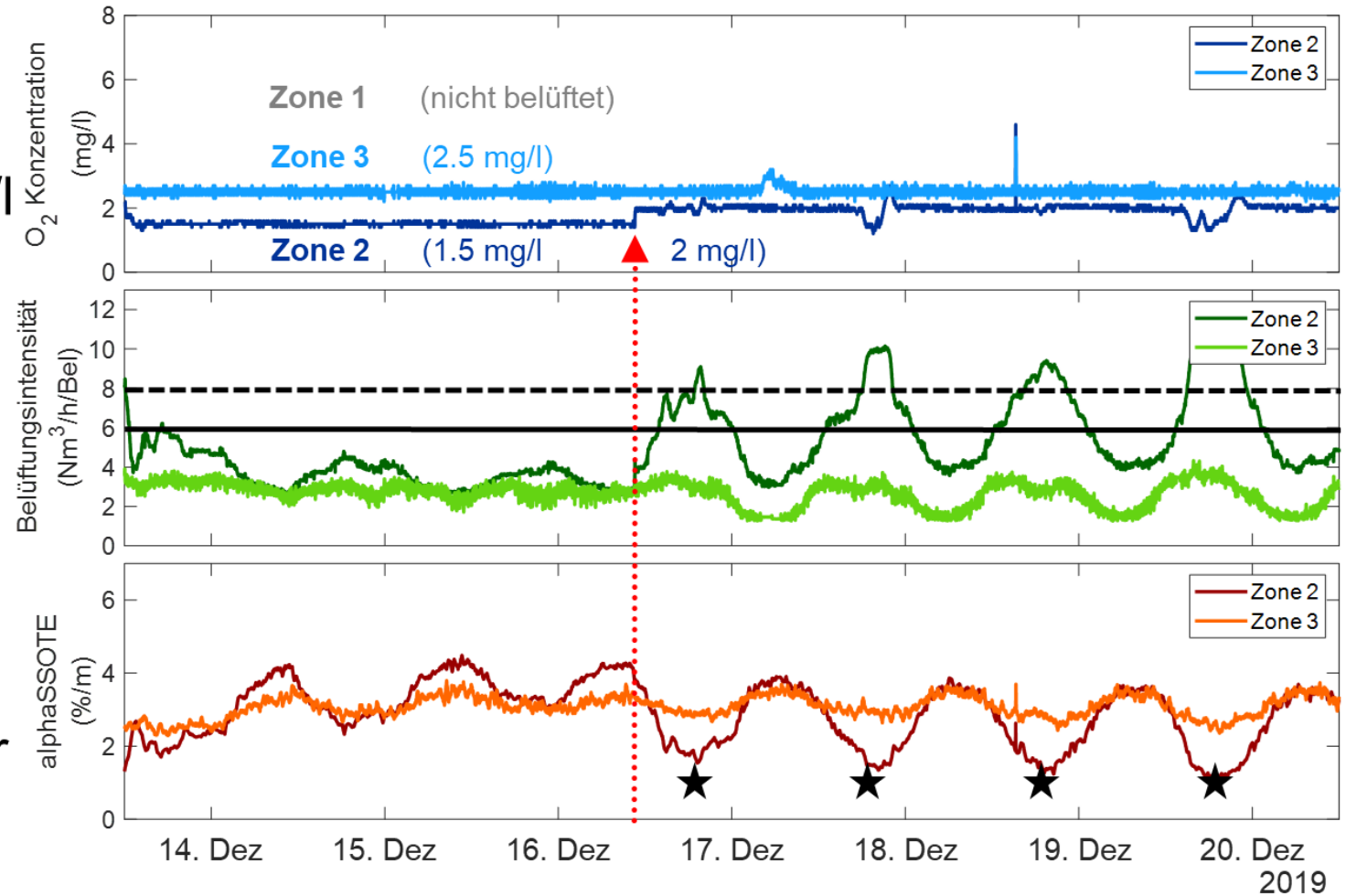


ARA Hofen: zu hohe Belüftungsintensität

▲ Kleine Änderung der Regelung (Zone 2 1.5mg/l -> 2mg/l) führt zu instabiler Regelung der Luftmenge in Zone 2

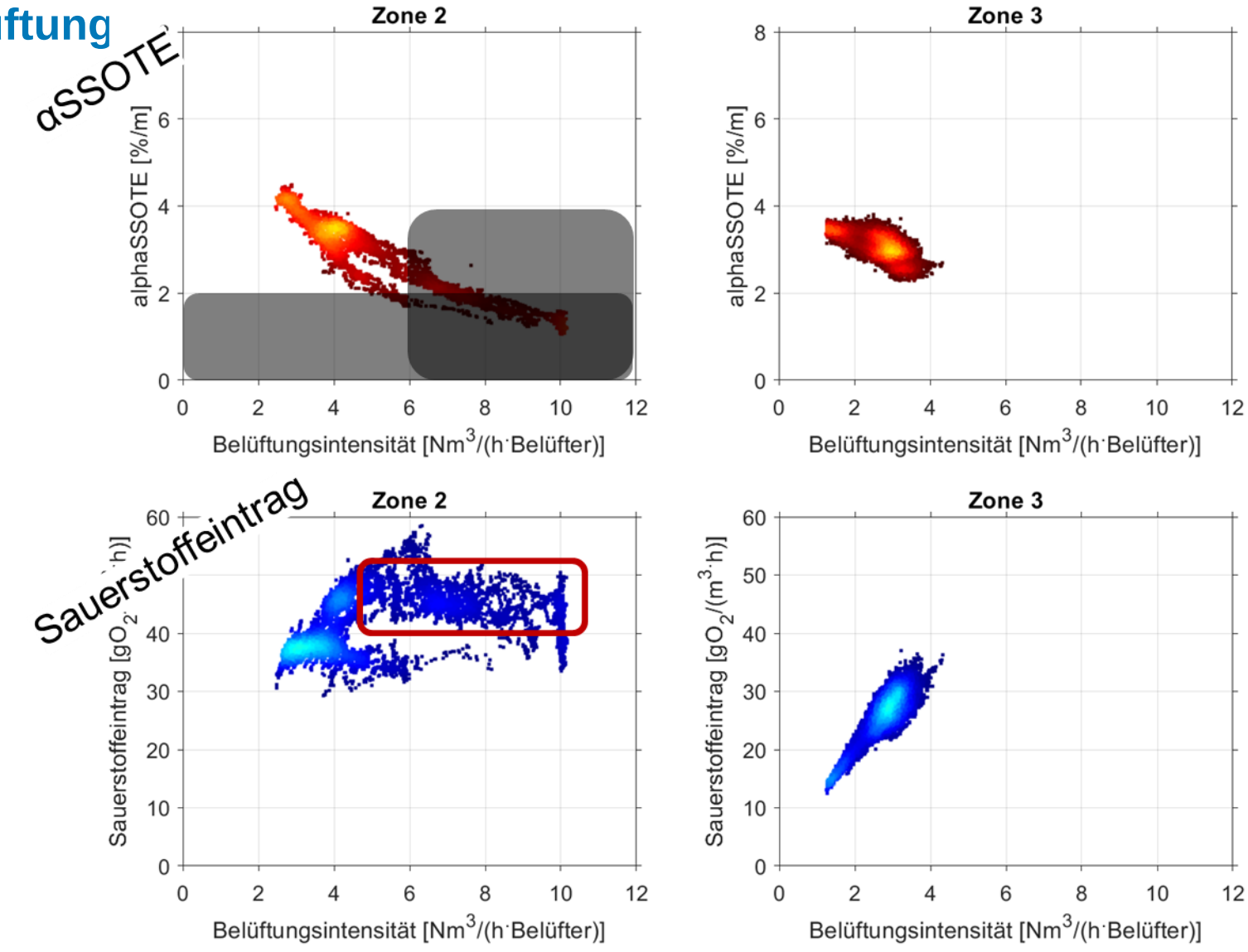
--- Membranen werden überbelastet (>6 Nm3/h)

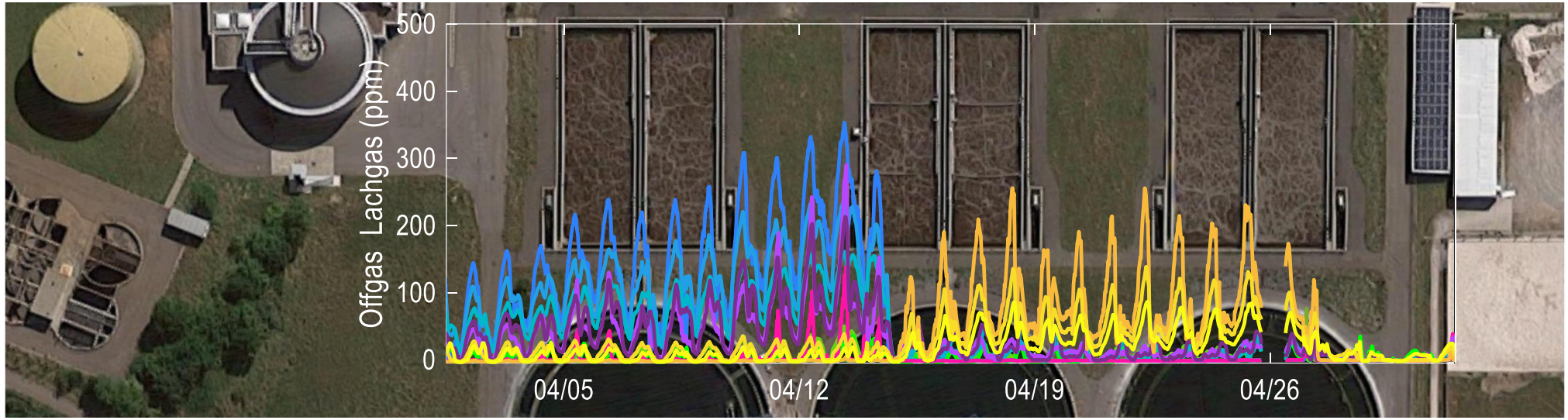
★ Sauerstofftransfer ist sehr schlecht bei hoher Belüftungsintensität



ARA Hofen: zu hohe Belüftung

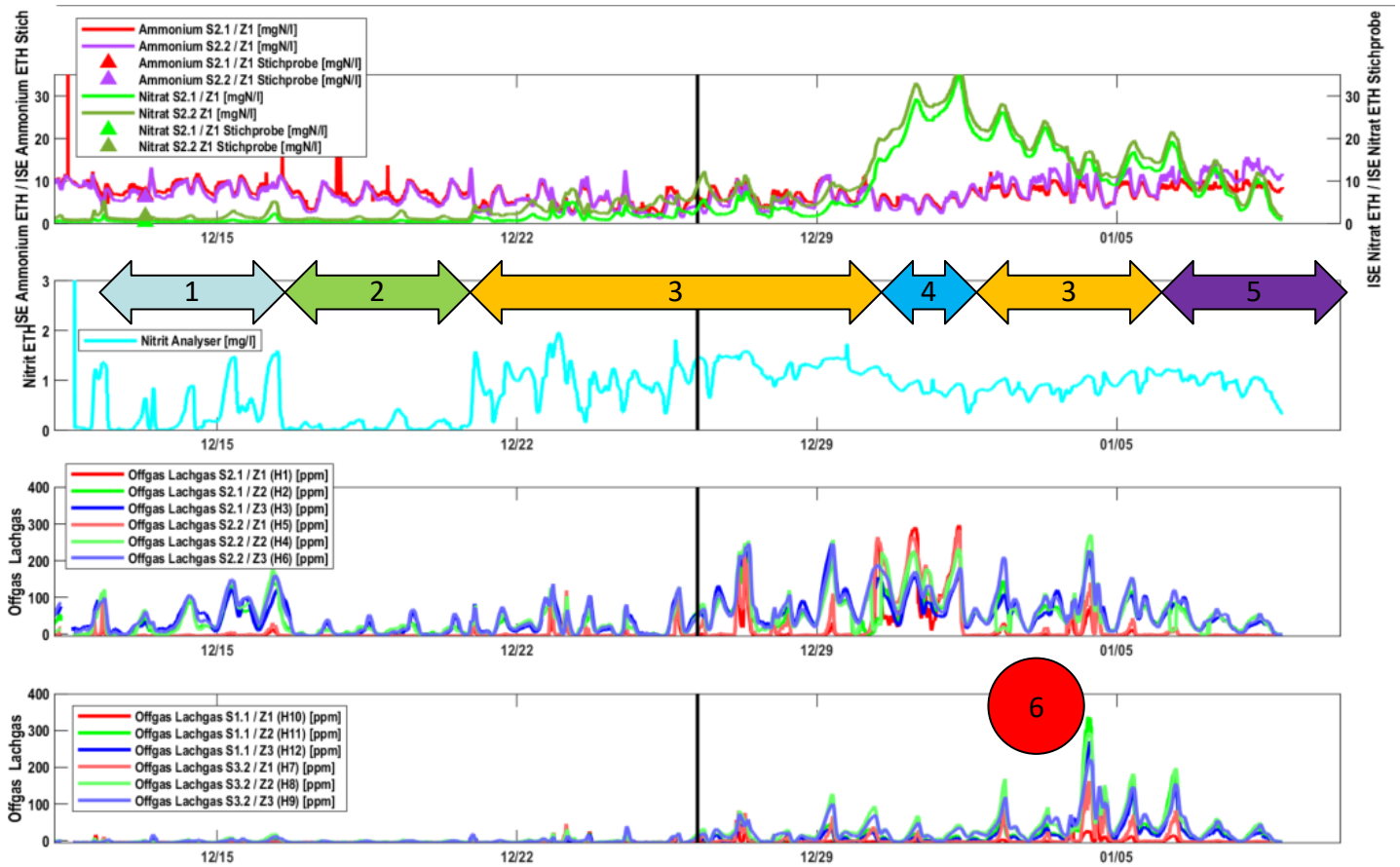
- In dieser Phase ist davon auszugehen, dass mit mehr Belüftungsintensität nicht mehr Sauerstoff eingetragen wurde.
- Variierende Abwasserzusammen-setzung ist nicht berücksichtigt!





Die wichtigsten Resultate zu Lachgas kurz zusammengefasst

Der Weihnachtsdatensatz 2019/20: Emissionsfaktor N_2O ca. 2 – 4%



Die Daten des Sensornetzwerkes sind komplex und enthalten sehr viele wertvolle Prozessinformationen!

1
Viel Faulwasser, wenig Belüftung

2
Wenig Faulwasser, viel Belüftung

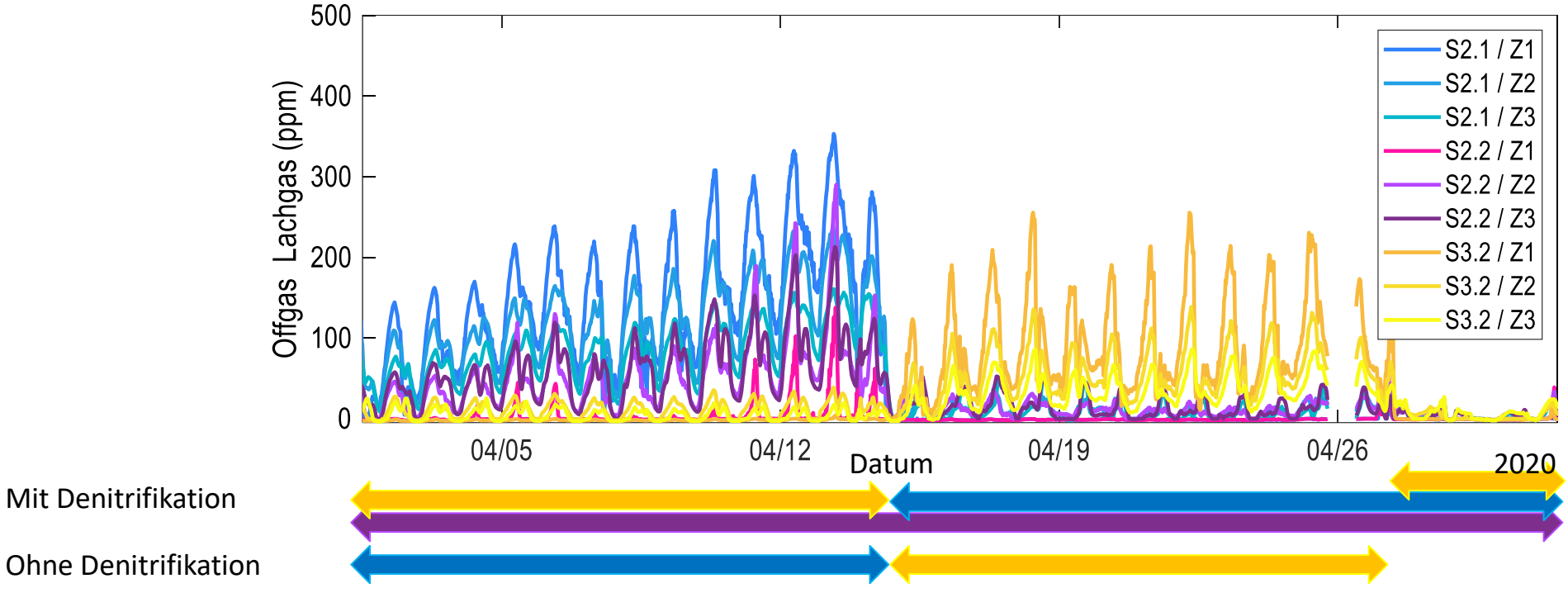
3
Weihnachtsferien, wenig Last

6
Regen
Kaltes Wasser

4
Weihnachtsferien,
Strasse 2 Dauerbelüftung

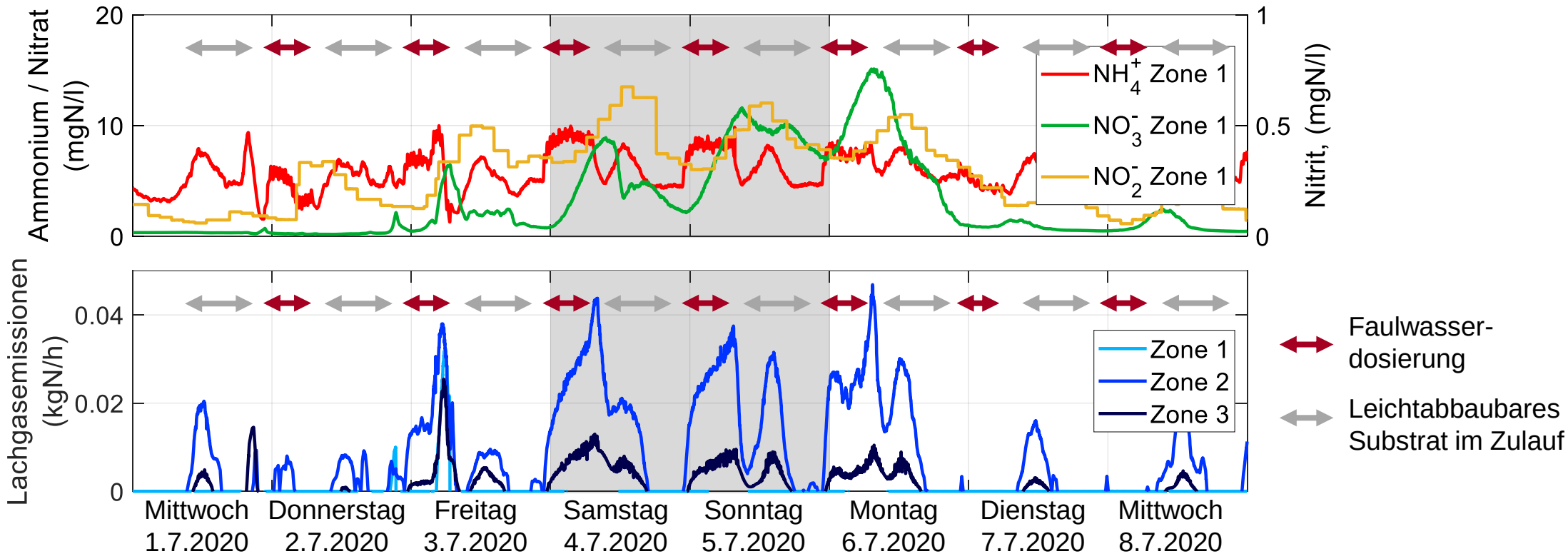
5
Ende Ferien
Wieder mehr leichtabbaubares Substrat

Der «Corona Datensatz» im Frühling 2020: Hohe N_2O Emissionen in der Strasse 2.1

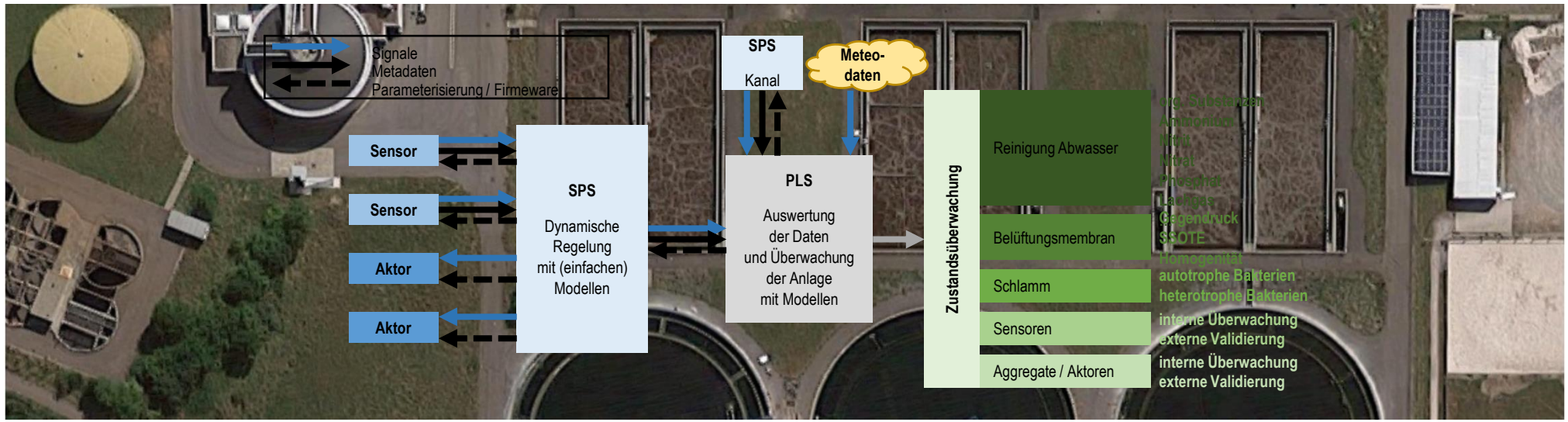


- Vom März bis zum 13. April 2020 wurde die 1. Zone der Strasse 2.1 durchgehend belüftet. In der Folge stiegen die N_2O-Emissionen in der Strasse 2.1 und auch in der Strasse 2.2 stark an.
- In der Vergleichsstrasse 3.2 waren die N_2O-Emissionen gering.
- Am 14. April wurde die Belüftung der Zone 1 der Strasse 2.1 abgestellt und die Belüftung der Zone 1 der Strasse 3.2 eingestellt

Masterarbeit Michael Vogel

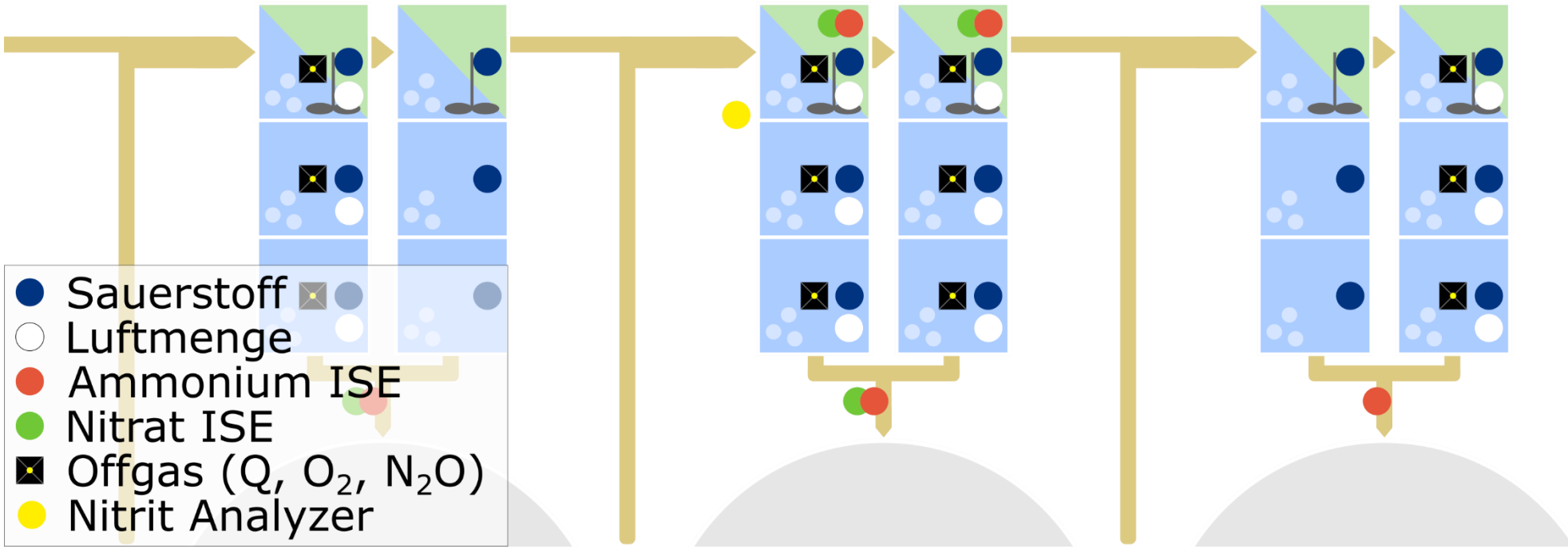


- Untersuchung von dem Zusammenhang zwischen Nitrat-, Nitrit, Lachgasemissionen
- Empfehlungen für Faulwasserdosierung.
- Lachgasemissionen können durch optimierte Faulwasserdosierung verringert werden.
- Gezielte Dosierung von leichtabbaubarem Substrat.



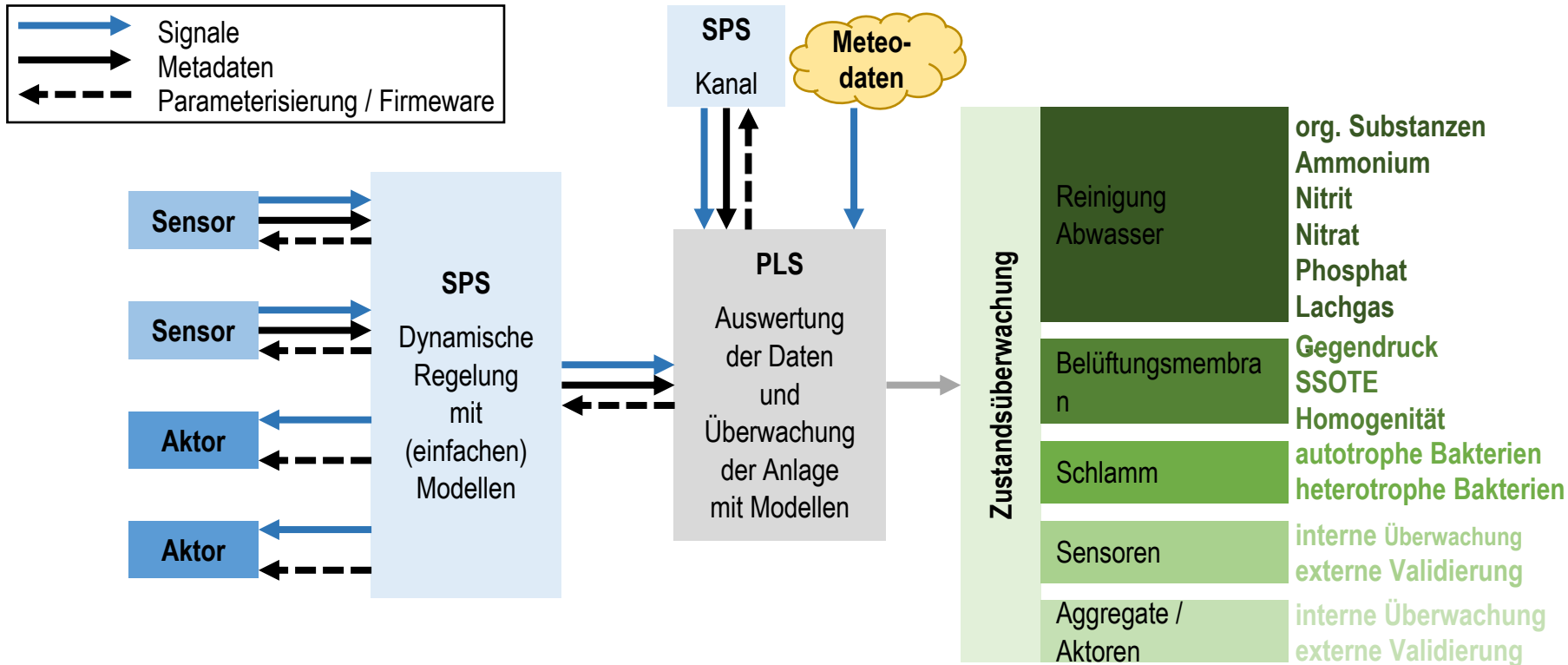
Weshalb braucht es ein Sensornetzwerk?
Kann man Messungen nicht mit Modellen ersetzen?

Prozessüberwachung mit Sensornetzwerken



- Durch den direkten Vergleich der einzelnen Strassen können Unsicherheiten bei der Variation des Abwassers ausgeschlossen werden.
- Mit Abluftmessungen können zeitliche Auflösungen von Prozessänderung im Bereich von 10 Minuten detektiert werden (z.B. durch Variation des Luftvolumenstroms in den Zonen)
- Durch die getrennten Schlammkreisläufe können Effekte von unterschiedlichen Schlammzusammensetzung untersucht werden.
- ……

Mit Redundanten Daten können Unsicherheiten verkleinert werden

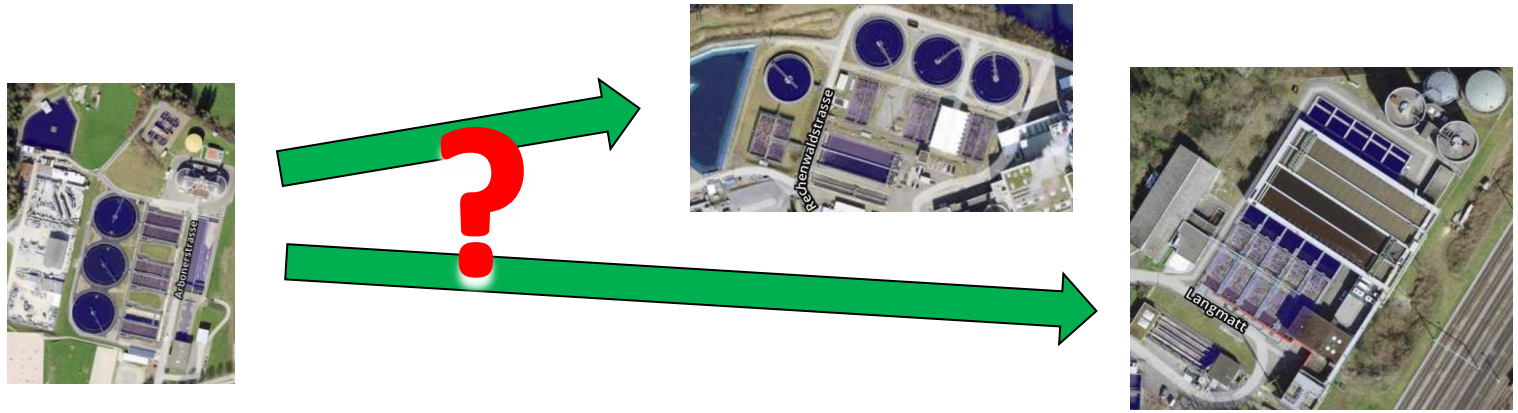


Ein Sensornetzwerke liefert hochredundante Daten, dadurch ist es möglich die folgenden Informationen zu gewinnen:

- Überwachung der Regelungsstrategie
- Prozessüberwachung und Verständnis der zeitlichen Zuläufe der Nährstoffe
- Überwachung der Sensoren – durch die Redundanz verringert sich der Kalibrierungs/Validierungs Aufwand

Es brauch Messungen und problemangepasste Modelle!

Können die Resultate der ARA Hofen auf andere ARA übertragen werden?



Eher ja:

- Sauerstofftransfermessungen: es braucht noch mehr Validierung und Erfahrung mit Alterung der Membranen.
- Konzept der dynamischen Regelung mit klar unterteilten Zonen ist sehr effizient (vergleich auch Resultate ARA Opfikon 2006 – 2015).
- Konzept des Sensornetzwerks: es braucht lokale Anpassungen und verbesserte Auswertung.

Eher nein:

- Tages- und Wochenverlauf der Lasten
- Tages- und Wochengang leichtabbaubares Substrat
- Temperaturverlauf im Winter
- …..

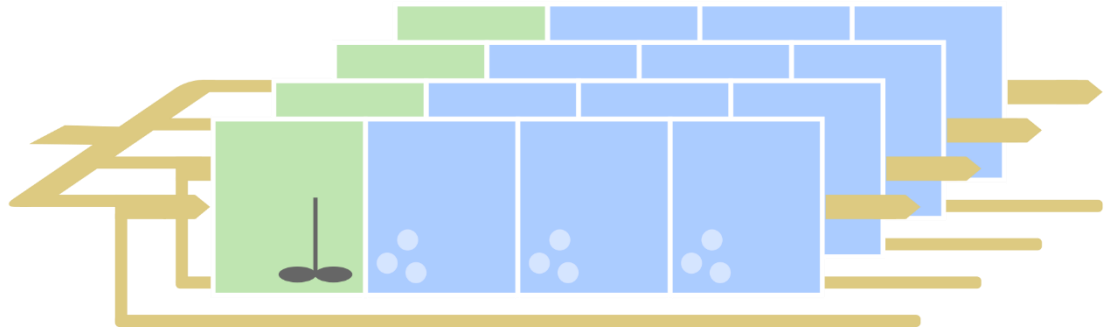
Dynamische Regelung von ARA: weitere Optimierungsparameter

Variabler Input

- *Tagesgang*
- *Wochengang*
- *Jahresgang*
- *Temperatur*
- *Regenereignisse*
- *Industrie*
- *Havarien*
- *...*

Optimierungsparameter

- *Lastverteilung in ARA*
- *Hydraulik, Durchmischung*
- *Belüftung*
- *Faulwassermanagement*
- *Schlammalter*
- *Rücklaufschlamm*
- *Interne Rezirkulationen*
- *Betriebsmitteleinsatz*
- *Netzmanagement*
- *...*



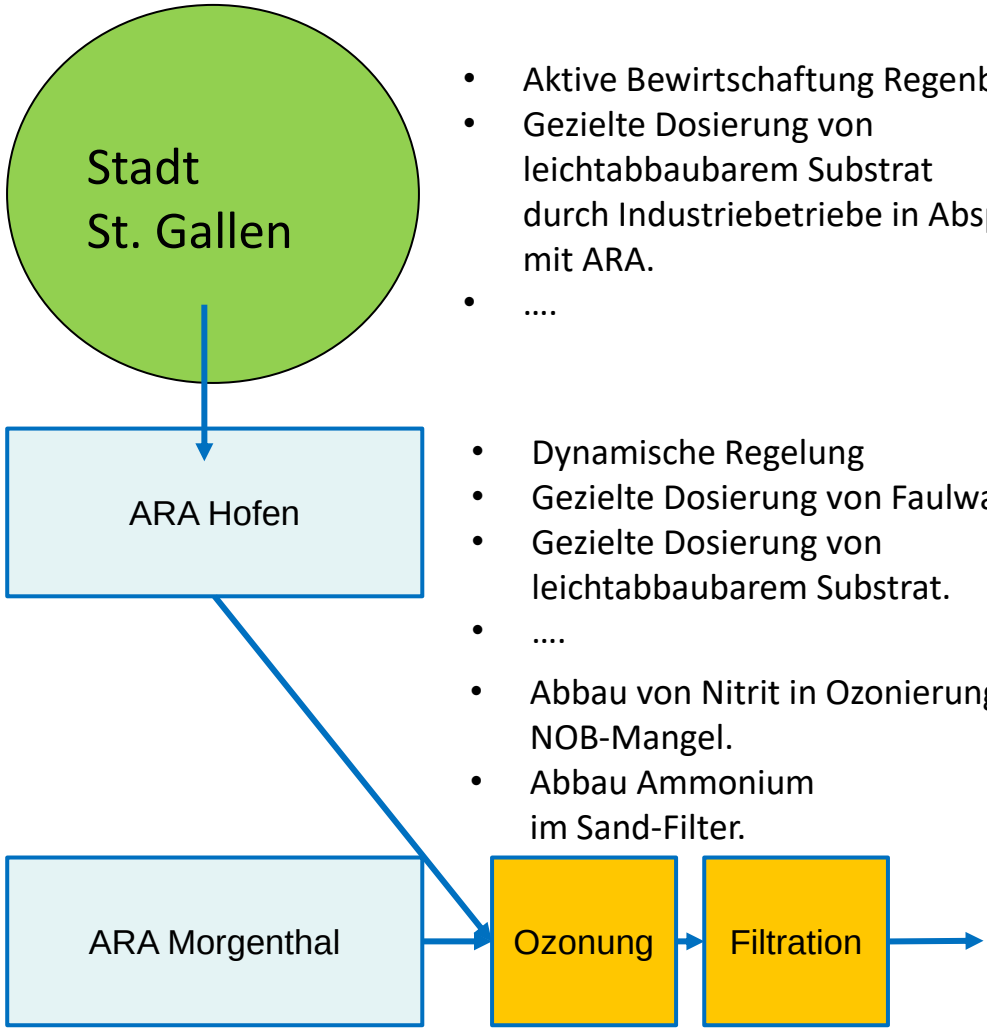
Optimierungsziele

- *Betriebssicherheit*
- *Abbau organische Stoffe*
- *Nitrifikation*
- *Denitrifikation*
- *Phosphor-Reduktion*
- *Nitrit-Reduktion*
- *Energieverbrauch*
- *Lachgas-Reduktion*
- *Betriebsmitteleinsatz*
- *Mikroverunreinigungen*
- *...*

Lachgas kann auch durch optimierte Faulwasserdosierung reduziert werden: Es braucht leichtabbaubares Substrat in der Deni-Zone, so dass Nitrat und Nitrit unmittelbar in Stickstoff umgewandelt werden.

Durch Absprache mit der Industrie kann leichtabbaubares Substrat gezielt dosiert werden!?

Schlussfolgerungen und Ausblick: Integrierte Optimierung



- Aktive Bewirtschaftung Regenbecken
- Gezielte Dosierung von leichtabbaubarem Substrat durch Industriebetriebe in Absprache mit ARA.
- ….

- Dynamische Regelung
- Gezielte Dosierung von Faulwasser
- Gezielte Dosierung von leichtabbaubarem Substrat.
- ….
- Abbau von Nitrit in Ozonierung bei NOB-Mangel.
- Abbau Ammonium im Sand-Filter.

- Durch exakte Prozesskontrolle können sowohl Reinigungsleistung wie auch Energieverbrauch optimiert werden.
- Gut konzipierte Sensornetzwerke sind ein sehr effizientes Werkzeug für die Prozessoptimierung im Betrieb.
- Abluftmessungen sind langzeitstabil und können sehr wertvolle Informationen liefern.

- Durch eine Gesamtbetrachtung Netzbewirtschaftung, den einzelnen Anlageteilen der ARA und der 4. Reinigungsstufe können in Zukunft signifikante Prozesssynergien genutzt werden.

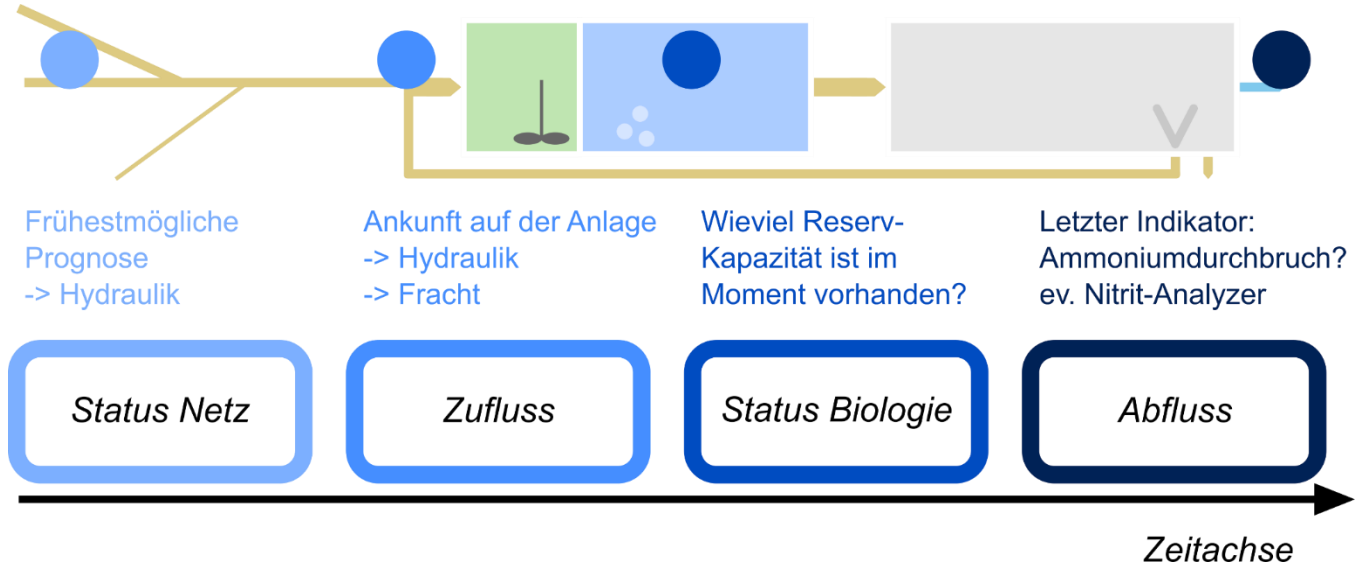
ARA Langmatt:
Dynamische Regelung für das Hybrid-Wirbelbett Verfahren

Betriebsmodi für die dynamische Regelung ARA Langmatt

	Belüftung C-Stufe	C_{O2} C-Stufe (mg/L)	C_{O2} N-Stufe (mg/L)	Faulwasser-dosierung
Tiefstlast	Rühren	0	4.0	Ein
Tieflast	Rühren	0	5.0	Ein
Mittellast	Ein	1.0	5.0	Ein
Hochlast	Ein	2.0	**5.0**	Aus
Regen	Ein	3.0	6.0	Aus

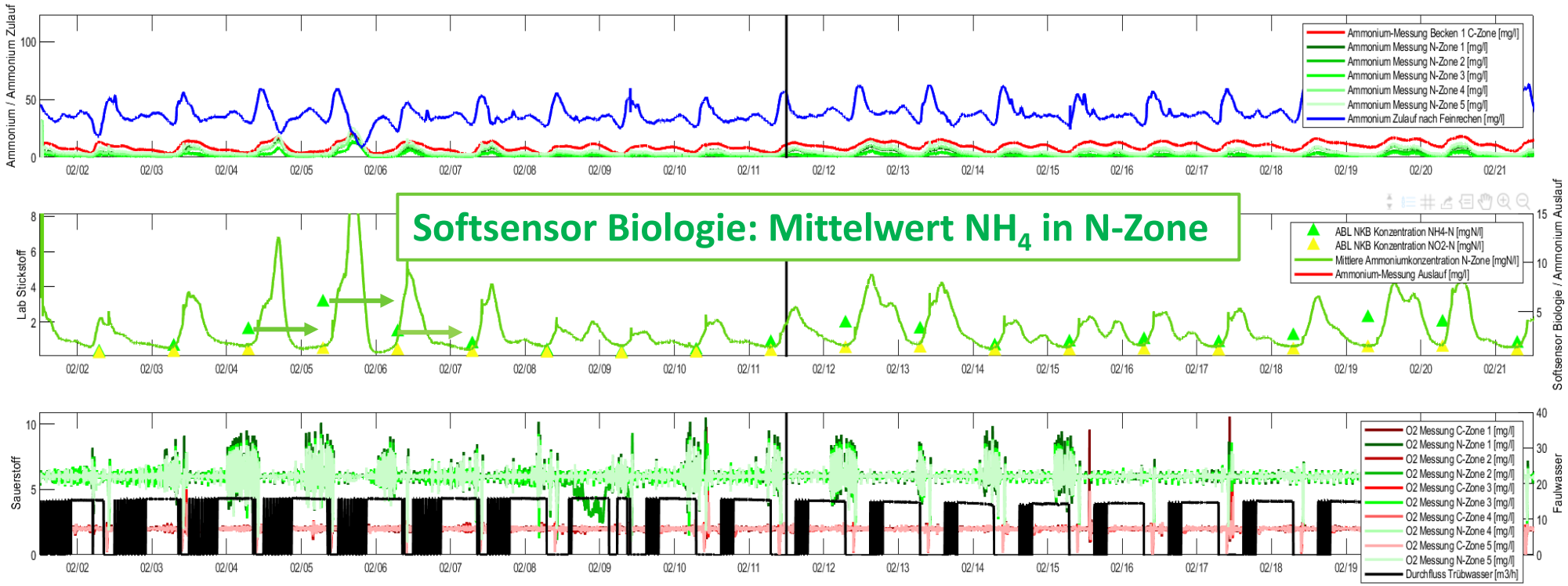
- Betriebsmodi werden im Moment durch Chestonag implementiert

Softsensoren zum Umstellen der Betriebsschemen



- Status Netz: Voraussage Regen meteoblue oder MeteoSchweiz
- Zufluss: Regendetektion bei Überschreiten von Trockenwetterzufluss
- Status Biologie: Ammoniumsensoren in N-Zone
- Abfluss: Ammonium-Analyser in Abfluss

Entwicklung von Softsensoren am Beispiel “Softsensor Biologie”



Softsensor Biologie ist von zentraler Bedeutung:

- Damit Nitrifikanten auf dem Wirbelbett wachsen braucht es möglichst viel Ammonium in der N-Zone!
- Aber möglichst wenig Ammonium sollte in den Abfluss gelangen!

DNA- und Abluft-Monitoring für ARAs

Robert Niederdorfer
PhD Mikrobielle Ökologie
Bereichsleiter DNA

Jonas Ruggle
MSc Energy Science and Technology ETH & Software Ingenieur
CFO

Manuel Layer
PhD Verfahrenstechnik
Bereichsleiter Abluftmessung

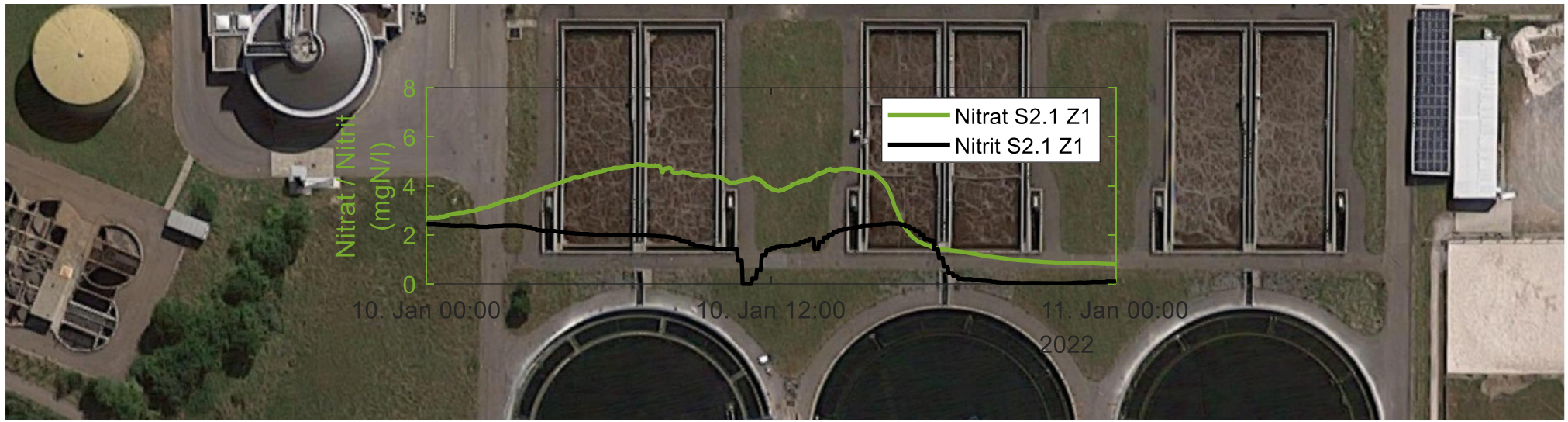
Wenzel Gruber
PhD Verfahrenstechnik
CEO

Dank

- LUIW : Luzia von Känel, Lucien Biolley, Matthias Stähle, Michael Vogel,
- ARA Hofen: Dani Gahler, Hanspeter Bauer
- Ch. Thürlimann (Kuster&Hager), C. Bassanello (BGG Engineering), P. Licskai (Insoft)
- ETH Zürich: Studierende der Umweltingenieurwissenschaften, Prof. Eberhard Morgenroth, Prof. Willi Gujer, Prof Max Maurer.
- Fachhochschule Nordostschweiz: Prof. David Zogg
- EAWAG: Wenzel Gruber, Adriano Joss
- ARA Opfikon: Christoph Liebi, Walti Wullschleger, Michael Kasper
- Klärwerk Werdhölzli: Dani Pfund, Christian Abegglen ….
- ARA Schönau: Bernd Kobler, Martin Grob, Thomas Klaus,
- DyRPA: Philipp Weber, Luzia von Känel ; Ruedi Moser (HBT), Christian Abegglen, Rolf Burch, Thomas Klaus, Ernst Lüdi, Markus Mendler, Alain Meyer, Daniel Pfund, Andreas Schaffner, Reto Steinemann, Urs Tobler, Martin Zeindler
- Und viele mehr….

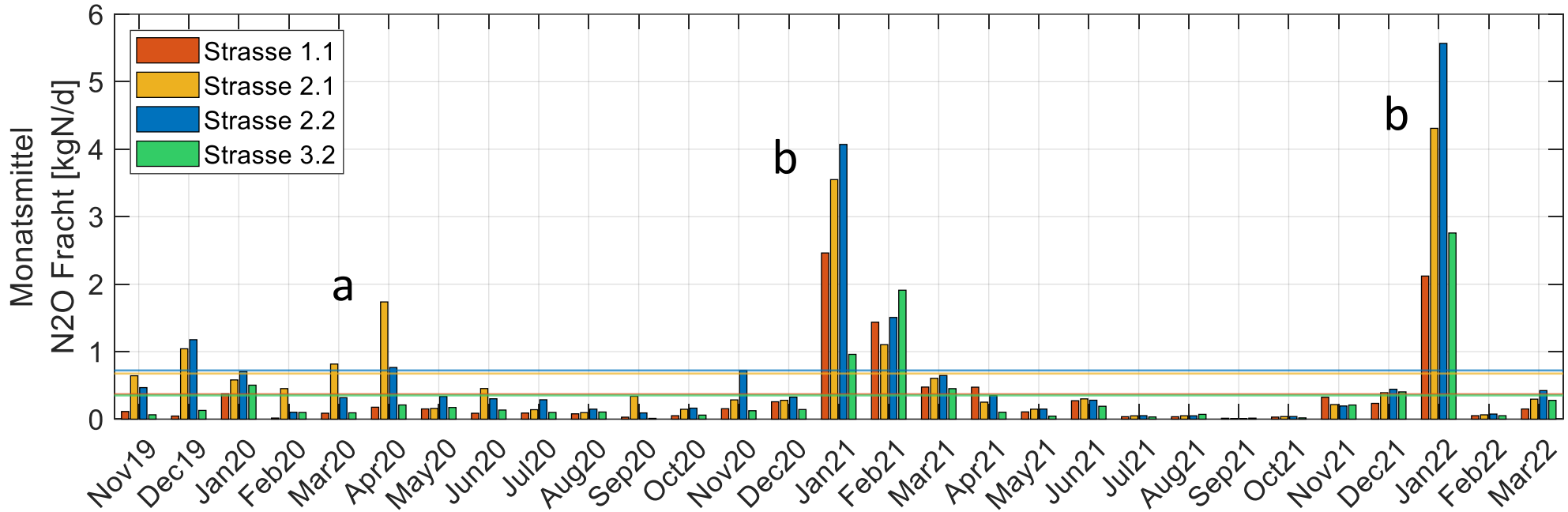
Referenzen

- Robuste und leistungsfähige Regelungskonzepte für Kläranlagen, Korrespondenz Abwasser, Abfall 8/2012
- Prozessorientierte Visualisierung, Aqua & Gas 12/2014
- Sauerstoff – Treibstoff der Nitrifikation, Aqua & Gas 7/2016
- Dynamische Regelung von ARA, Aqua & Gas 1/2019
- Dynamische Regelung der ARA Hofen, , Aqua & Gas 1/2022
- https://luiw.ethz.ch/projekte/senara.html
- https://luiw.ethz.ch/projekte/dyrpa.html
- https://luiw.ethz.ch/projekte/offgas.html



Anhang:
Mit dem Sensornetzwerk können sehr viel Prozesse (empirisch) erklärt werden

Lachgasemissionen über längere Zeit
Erhöhte Lachgasemissionen treten auf wenn Nitrit produziert wird

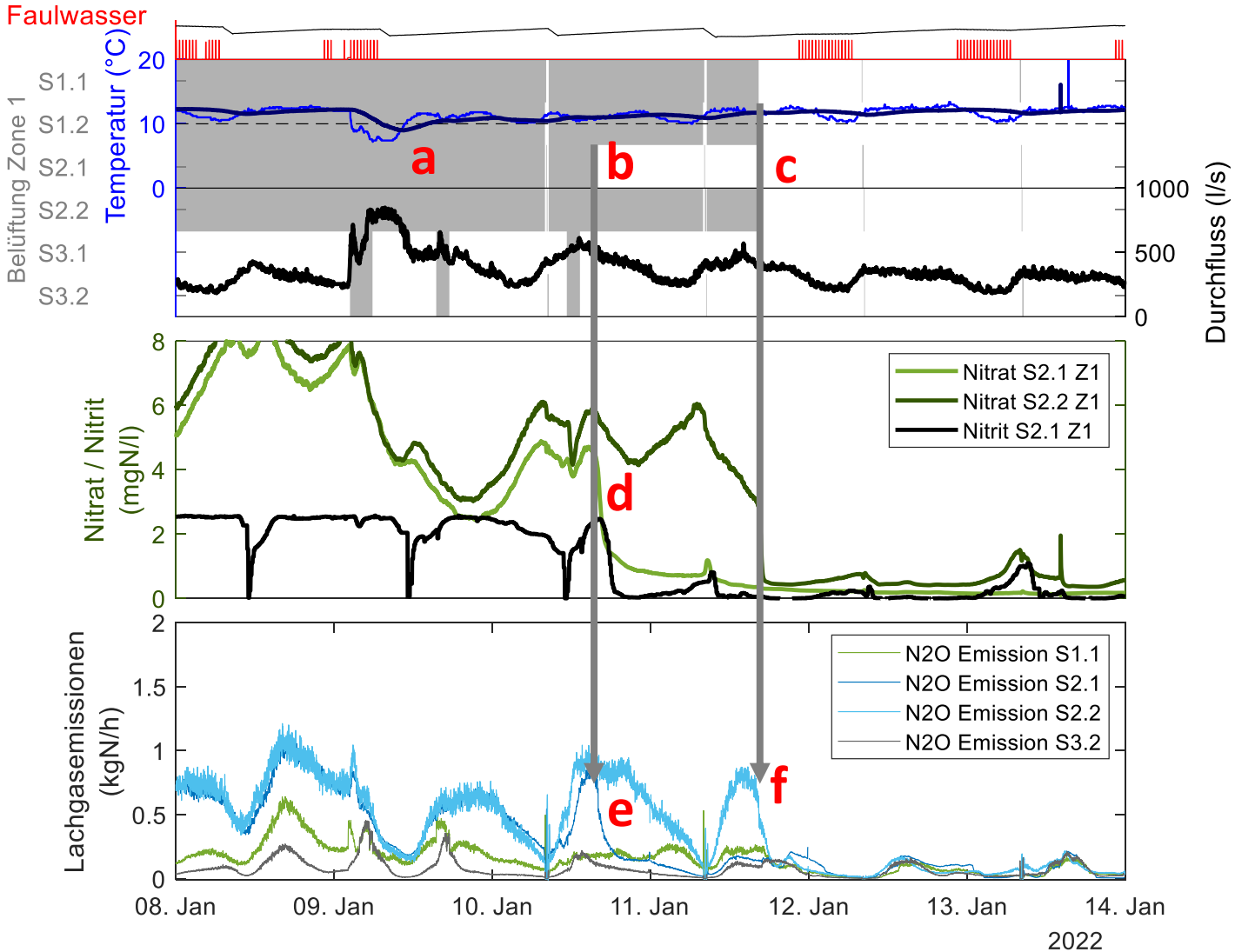


a) Strasse 2.1, Zone 1 während 2 Monaten belüftet.

b) Sehr kaltes Wetter: relative starker Verlust von NOB, dadurch wird Nitrit in der Biologie akkumuliert und es kommt zu starker Lachgasbildung.

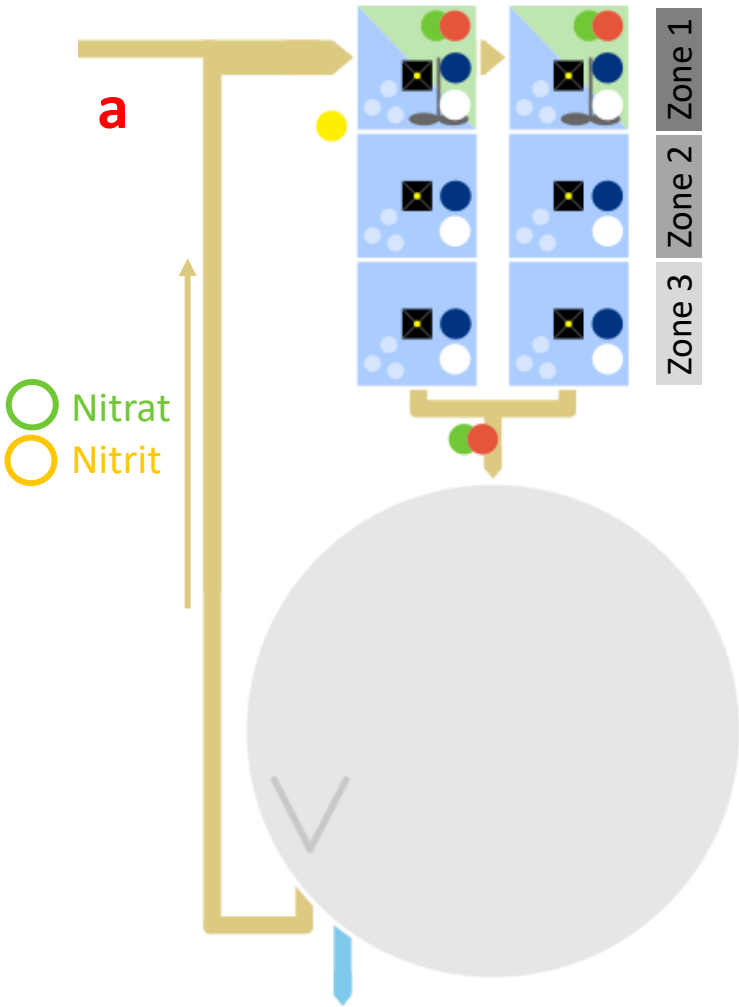
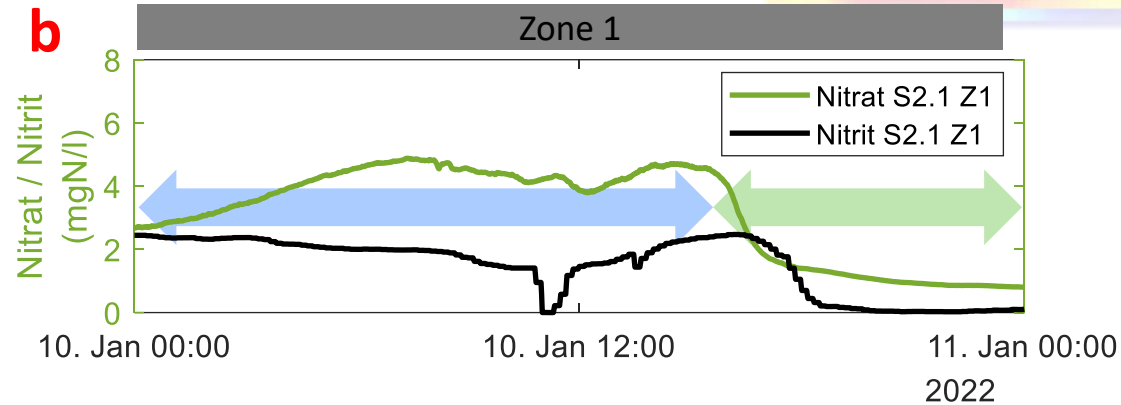
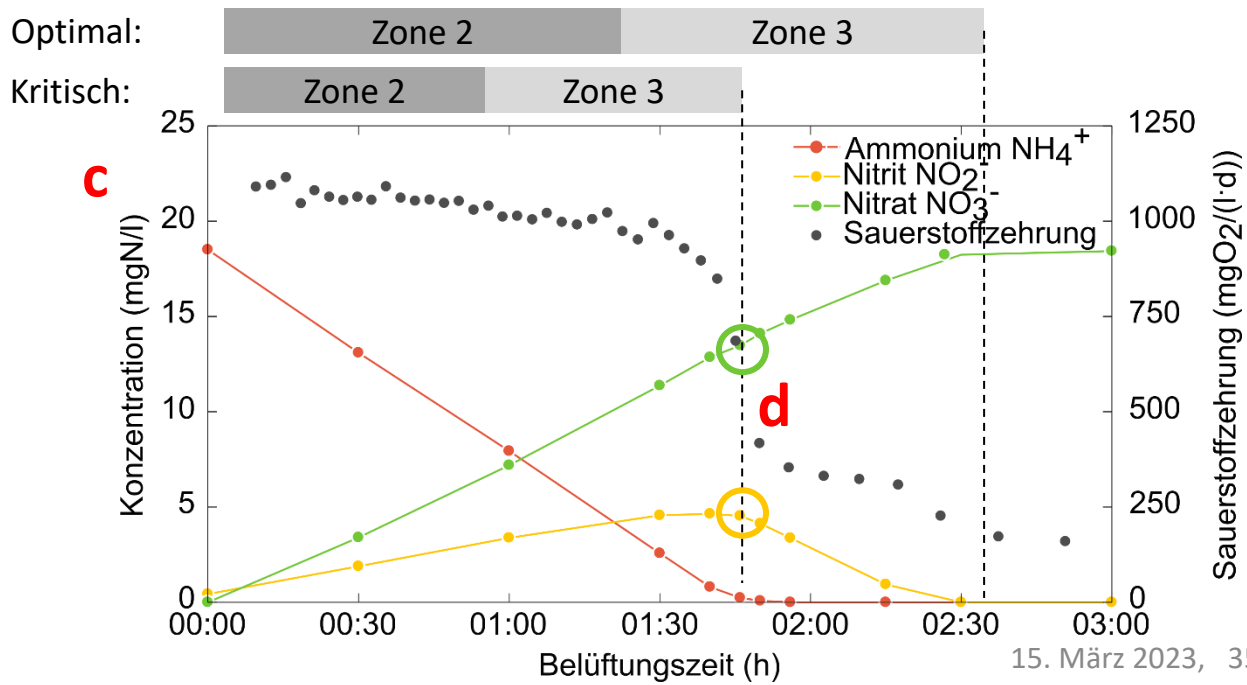
Anmerkung: die Strasse 2.1 und 2.2 wurden häufig als Referenzstrassen mit belüfteten 1. Zone betrieben: aus diesem Grund sind die Emissionen in der Strasse 2 höher.

Beispiel Januar 2022: Abbau von Nitrit mit leichtabbaubarem Substrat



a) Strasse 1.1, 1.2, 2.1, 2.2: Zone 1 belüftet: hohe Lachgasemissionen in der Strasse 2.1 und 2.2.

b) Zone 1 Strasse 2.1 wird am Montagnachmittag auf anoxisch umgestellt. Zu diesem Zeitpunkt ist viel leichtabbaubares Substrat vorhanden: Nitrat und Nitrit werden sehr schnell denitrifiziert (d), die N2O-Emissionen in der Strasse 2.1 fällt schnell ab (e)!

c) Bei allen Strassen wird die Zone 1 auf anoxisch umgestellt: nur noch geringe N2O-Emissionen (f).

Prozesse in den einzelnen Zonen