

# MODIFIZIERTES ANAMMOX-VERFAHREN

## FAULWASSERBEHANDLUNG MIT STABILER PROZESSFÜHRUNG

Bei der anaeroben Ammonium-Oxidation, kurz Anammox, werden Ammonium und Nitrit im Faulwasser zu Stickstoffgas umgewandelt. Das Verfahren ist auch auf einigen Schweizer ARA im Einsatz. Da aber nicht alle Anlagen die Sollleistung erfüllten, wurde das Anammox-Verfahren untersucht und weiterentwickelt. Mit dem Wechsel von der ein- zur zweistufigen Verfahrensführung wurde nicht nur eine höhere Betriebsstabilität bei der biologischen Entstickung von Rückläufen aus der Schlammmentwässerung, sondern teils auch höhere Leistungen erreicht.

*Adriano Joss\*; Marco Kipf; Eberhard Morgenroth, Eawag  
Martin Baggenstos, Hunziker Betatech AG; David Salzgeber, Holinger AG*

### RÉSUMÉ

#### ANAMMOX – TRAITEMENT DES EAUX USÉES AVEC GESTION STABLE DES PROCÉDÉS

L'oxydation anaérobie de l'ammonium, ou anammox, consiste à transformer l'ammonium et le nitrite contenus dans les eaux usées en gaz d'azote. Le procédé est utilisé par certaines STEP suisses. Etant donné que toutes les installations ne satisfaisaient pas à la capacité visée, le procédé anammox a été étudié et développé dans sept sites (installations de taille réelle et essais pilotes). Le passage du procédé d'une à deux étapes a permis aux installations d'atteindre une stabilité supérieure lors de la dénitrification biologique des retours provenant de la déshydratation des boues. Le procédé s'adapte aux situations opérationnelles exceptionnelles comme les fluctuations de la teneur en matières solides du liquide centrifugé, les erreurs d'alimentation ou l'aération excessive. Même les performances de dénitrification se sont nettement améliorées. La formation de nitrite, qui peut se produire dans le premier réacteur durant le procédé à deux étapes en cas d'alimentation adéquate en oxygène et sans oxydation indésirable du nitrite (formation accrue de nitrate), est déterminante pour une performance globale élevée. Trois nouvelles installations sont en cours de planification ou de construction. Les modifications du procédé anammox décrites dans l'article seront directement intégrées dans les nou

### EINFÜHRUNG

Per 2027 wird eine Neuerung der Gewässerschutzverordnung erwartet. Diese wird die Abwasserreinigungsanlagen (ARA) verpflichten, die N-Elimination von heute 52% (Schweizer Mittelwert gemäss *Thomann et al.* [1]) auf 70% oder sogar mehr zu erhöhen. Da Rückläufe der Schlammbehandlung 15 bis 20% der N-Fracht im Zulauf ausmachen, kann eine Faulwasserentstickung hierzu einen bedeutenden Beitrag leisten – im Besonderen bei überlasteten Anlagen sowie bei Annahme von Fremdschlämmen oder Ko-Substraten.

2017 wurde im Rahmen einer VSA-Tagung festgehalten, dass etwa ein Drittel der Schweizer Anammox-Anlagen die erforderliche Leistung nicht erreichte; *Lackner et al.* [2] beschreiben vergleichbare Probleme mit der Prozessstabilität einstufiger Anlagen im Ausland. Seitdem wurde das Anammox-Verfahren an sieben Schweizer Standorten untersucht und weiterentwickelt. Nach einer Vielzahl an einzelnen Modifikationen wird heute eine deutlich höhere Leistung mit guter Prozessstabilität erreicht. Gegenwärtig sind drei neue Anlagen in Planung oder im Bau. Diese werden die Modifikationen direkt integrieren. Dieser Artikel beschreibt das verbesserte Verfahren und erläutert die Gründe für die deutlich höhere Leistung.

\* Kontakt: [adriano.joss@eawag.ch](mailto:adriano.joss@eawag.ch)

(Titelbild: Anammox-Granulen)

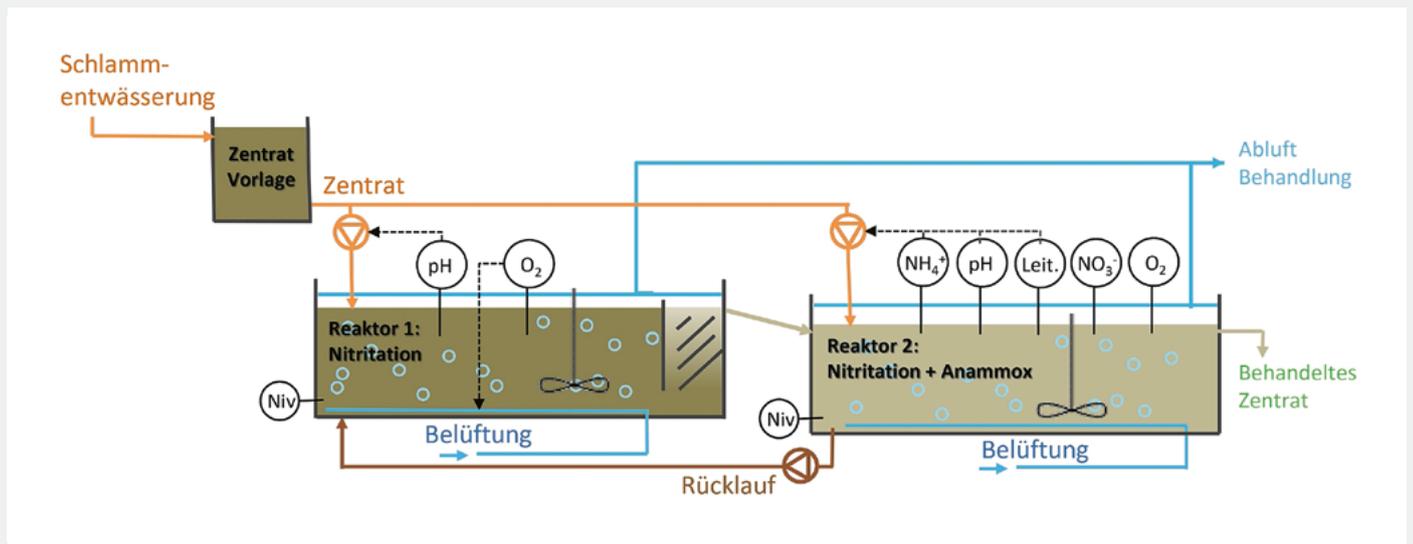


Fig. 1 Schematische Darstellung einer Faulwasserbehandlungsanlage mit zweistufigem Nitritation/Anammox-Verfahren.  
Leit.: Leitfähigkeitssonde; Niv: Füllstandssonde.

### AUFBAU UND PROZESSFÜHRUNG

Die wichtigste Änderung gegenüber dem Stand 2017 ist, dass von einer einstufigen zu einer zweistufigen Verfahrensführung gewechselt wurde (Fig. 1): Der erste Reaktor produziert dabei 65–85% des Nitrits, während der zweite Reaktor die restlichen 15–35% Nitrit bildet; zudem findet die gesamte Entstickung via Anammox-Prozess in diesem Reaktor statt. Schlammalter und Belüftung in den beiden Stufen können so separat kontrolliert werden, was der Hauptgrund für die höhere Prozessstabilität und Leistung ist (s. «Prozessstabilität»). So braucht eine leistungsstarke Nitritation viel Sauerstoff ( $\geq 2 \text{ mg O}_2/\text{l}$ ) und unter Umständen ein tiefes Schlammalter (um die Nitrit-Oxidation, d. h. Nitratbildung, zu verhindern), während die langsam wachsenden Anammox-Bakterien ein zuverlässiges Zurückhalten ihrer Biomasse und  $\text{O}_2$ -Konzentrationen unter  $1 \text{ mg O}_2/\text{l}$  erfordern, um eine hohe Leistung zu erreichen.

#### REAKTOR 1

Reaktor 1 wird wie folgt betrieben:

##### Schlammalter

Bei  $30^\circ\text{C}$  ist ein Mindestschlammalter zwischen eineinhalb und zwei Tagen erforderlich. Die unerwünschte Oxidation von Nitrit zu Nitrat kann durch das geringe Schlammalter verhindert werden.

##### Belüftung

Die Belüftung wird so eingestellt, dass immer  $\geq 2 \text{ mg O}_2/\text{l}$  vorliegen. Für eine

effiziente Nutzung der Luft ist eine Regelung der Belüftung nach der Sauerstoffkonzentration sinnvoll.

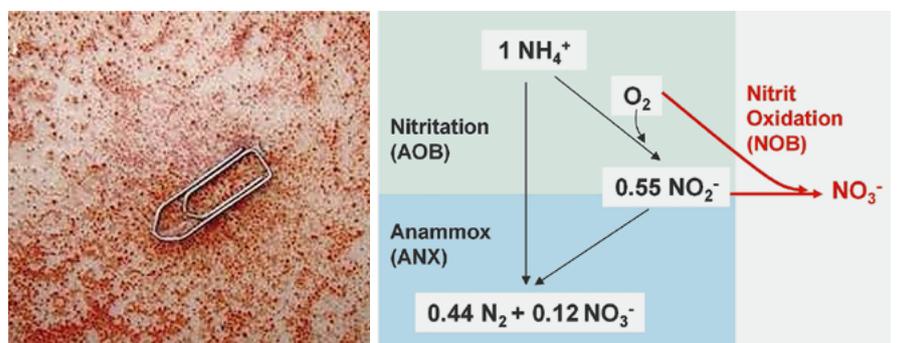
##### Beschickung

Die Beschickung des Reaktors mit Zentrat erfolgt intermittierend und wird durch den pH-Wert gesteuert mit dem Ziel, die Hälfte des zugeführten Ammoniums zu Nitrit zu oxidieren. Wenn der pH-Wert unter den Sollwert fällt, wird eine bestimmte Menge an Zentrat in den Reaktor geleitet. Dadurch steigt die Konzentration von  $\text{NH}_4^+$  und damit der pH-Wert. Bei der

Oxidation von  $\text{NH}_4^+$  zu  $\text{NO}_2^-$  wird Säure freigesetzt, wodurch der pH-Wert wieder sinkt. Im Allgemeinen liegt der Kontrollwert für den pH-Wert zwischen 7,0 und 7,2: Unter pH 7,0 ist mit einer Hemmung der Ammonium oxidierenden Bakterien (AOB) zu rechnen, und bei einem deutlich höheren pH-Wert wird weniger als die Hälfte des  $\text{NH}_4^+$  im Zulauf zu  $\text{NO}_2^-$  oxidiert, was ebenfalls nicht optimal ist (die Anammox-Bakterien verbrauchen  $1,2 \text{ Mol NO}_2^-$  pro  $\text{Mol NH}_4^+$ ; s. Box). Eine kontinuierliche, variable Beschickung mit einer pH-Regelung ist auch denkbar.

#### WAS IST ANAMMOX?

«Anammox» steht für «anaerobe Ammonium-Oxidation». Bei dieser Art der Entstickung werden Ammonium und Nitrit zu Stickstoffgas ( $\text{N}_2$ ) umgewandelt. Das hierzu erforderliche Nitrit wird bei technischen Entstickungsverfahren durch aerobe Nitritation gebildet. Die Nitrit-Oxidation (roter Prozess im Bild rechts) ist unerwünscht, weil das gebildete Nitrat in gelöster Form verbleibt und somit nicht oder nur sehr langsam zum gasförmigen  $\text{N}_2$  denitrifiziert wird.



Links: Gefärbte Anammox-Biomasse aus einer Anreicherung in Laborreaktoren.

Rechts: Die drei wichtigsten Prozesse der Entstickung mit Anammox: Nitritation durch Ammonium oxidierende Bakterien (AOB), Entstickung durch Anammox (ANX) und Nitrit-Oxidation (NOB).

**REAKTOR 2**

Reaktor 2 wird wie folgt gestaltet und betrieben:

**Rückhalt der Biomasse**

Ein sicherer Rückhalt der langsam wachsenden Anammox-Bakterien ist zu gewährleisten. Je nach Anlagenausführung erfolgt dies mittels Biofilmbewuchs auf Trägermaterial, mittels granulierter Biomasse oder mittels suspendierten Schlamms mit entsprechend hohem Schlammalter. Es wird vermutet, dass größere Biofilmstrukturen ( $\geq 0,5$  mm) zur Prozessstabilität beitragen, z. B. bei hohen  $O_2$ - oder  $NO_2^-$ -Konzentrationen. Im Fall eines Trägers sind gute Aufwuchseigenschaften, Fluidisierung mit geringen Luftmengen und eine langfristig stabile Biofilmoberfläche<sup>1</sup> relevant.

**SBR-Modus**

Reaktor 2 wird im SBR-(*Sequencing-Batch-Reactor*-)Modus betrieben. Ein Batch umfasst folgende Schritte:

- Füll- und Reaktionsphase mit intermittierender Beschickung und kontinuierlicher Belüftung (allenfalls auch kontinuierliche Beschickung mit variabler Menge)
- Abbauphase des Restnitrits unter Rühren ohne Zulauf und ohne Belüftung: In 10 bis 30 Minuten wird das Nitrit über den Anammox-Prozess vollständig abgebaut. Somit wird weniger als  $1 \text{ mg } NO_2^- \text{-N/l}$  in die Biologie zurückgeführt, was hier  $N_2O$ -Emission verhindert.
- Sedimentation (nicht immer erforderlich, erlaubt Rückhalt von suspendierter Biomasse)
- Dekantieren<sup>2</sup>

**Luftmenge**

Die Luftmenge der Belüftung wird so eingestellt, dass keine Akkumulation von Nitrit ( $< 20 \text{ mg } NO_2^- \text{-N/l}$ ) stattfindet. Eine automatische Luftmengenregelung

<sup>1</sup> In geschützten Bereichen bildet sich mittelfristig ein Biofilm von 1 mm Dicke oder mehr. Massgebend für die Anammox-Leistung ist dann nicht mehr die Oberfläche des Aufwuchskörpers, sondern die effektive Oberfläche des Biofilms.

<sup>2</sup> Unter Umständen ist es vorteilhaft, den Batch-Zyklus mit Sedimentation und Abzug zu beginnen, weil so der Automatikbetrieb nach einem manuellen oder unkontrollierten Betriebsabbruch jederzeit ohne weitere Eingriffe gestartet werden kann.

in Kombination mit einer Nitritmessung (Analyzer) ist auch denkbar. Eine Regelung der Belüftung mit der Sauerstoffkonzentration hat sich nicht bewährt, da dieser Messwert zwischen 0 und  $1 \text{ mg } O_2 \text{/l}$  zu stark schwankt: Im Vollmassstab ist die  $O_2$ -Konzentration im Reaktor nicht homogen, sondern variiert stark. Als Kontrollparameter ist die Sauerstoffmessung aber beizubehalten.

**Beschickung**

Die Beschickung mit Zentrat erfolgt intermittierend, um sicherzustellen, dass  $NH_4^+$  immer in ausreichender Menge als Substrat für die Anammox-Biomasse vorhanden ist ( $> 10 \text{ mg } NH_4^+ \text{-N/l}$ ). Dies kann wahlweise nach dem  $NH_4^+$ -Signal, dem pH-Signal oder dem Leitfähigkeitssignal geregelt werden.

**Leitfähigkeitssignal**

Das Leitfähigkeitssignal dient der Betriebsüberwachung für eine Fehlfunktion oder als Ersatzwert für das  $NH_4^+$ -Signal: Im Normalbetrieb ist das Signal proportional zur  $NH_4^+$ -Konzentration. Wenn das  $NH_4^+$ -Signal jedoch gestört ist (z. B. wenn die Sonde driftet) oder wenn sich Nitrit ansammelt, kann dies erkannt werden, da sich die Proportionalität der beiden Signale ändert.

**Nitratsignal**

Das Nitratsignal zeigt an, ob sich eine Population an Nitrit oxidierenden Bakterien (NOB) bildet, nämlich dann, wenn die Nitratkonzentration deutlich über die üblichen 12% des umgesetzten Ammoniums ansteigt (s. *Box*). Diese Fälle sind selten und deshalb wird nicht empfohlen, das Nitratsignal in eine Regelung einzubinden. Bildet sich eine bedeutende NOB-Population im Reaktor 2, so kann diese durch Drosseln oder vorübergehendes Abschalten der Belüftung bekämpft werden.

 **$O_2$ -Werte**

Die gemessenen  $O_2$ -Werte zeigen an, dass es zu einer Hemmung der Sauerstoffaufnahme kommt, nämlich wenn diese Werte ohne erhöhte Luftzufuhr ansteigen. Bei  $O_2$ -Konzentration  $> 1,5 \text{ mg } O_2 \text{/l}$  kann eine signifikante, aber reversible Hemmung der Anammox-Aktivität eintreten.

Mit dieser Prozessführung wird die Anlage stets bei maximaler Leistung betrieben entsprechend der vorliegen-

den biologischen Aktivität. Falls die Abbauleistung der anfallenden Faulwassermenge angepasst werden muss, so kann dies entweder durch Pausieren des Betriebs oder durch eine konstant reduzierte Leistung erreicht werden (s. «Mögliche Prozessvarianten»). Die Nitrifikation ist in der Regel leistungsbegrenzend für die gesamte Anlage, sprich die Entstickungsrate wird durch die Nitritbildungsrate bestimmt. Nur während des Einfahrtbetriebs ist die Anammox-Aktivität begrenzend, ansonsten weist diese normalerweise eine bedeutende Leistungsreserve auf.

Gemäss bisherigen Messungen werden etwa 2% des N im Zulauf als  $N_2O$  in der Abluft emittiert [3]. Diese Abluft kann in der Schlammverbrennung (erforderliche Brenntemperaturen  $\geq 900$  °C) oder durch eine separate Abluftbehandlung mit RTO (regenerative thermische Oxidation) behandelt werden. Im Rahmen einer Studie wurde das RTO-Verfahren pilotiert. Die Auswertung der Versuche ist abgeschlossen und zeigt, dass Lachgas aus der Abluft der Anammox-Anlage energieeffizient entfernt werden kann [4].

**MÖGLICHE PROZESSVARIANTEN**

Entsprechend den lokalen Rahmenbedingungen können verschiedene Prozessvarianten von Interesse sein:

**Reaktor 1 mit oder ohne Schlammrückhalt**

Ein Schlammrückhalt ist erforderlich (z. B. Lamellenabscheider), falls die Nitrifikation bei 30 °C mit einer hydraulischen Aufenthaltszeit von  $< 1,5$  Tage<sup>3</sup> betrieben werden soll. Eine Nitrifikationsleistung im Bereich von  $500$  bis  $650 \text{ g } NO_2^- \text{-N/m}^3_{\text{Reaktor1}} \text{/d}$  sollte bei 30 °C mit Schlammrückhalt erreicht werden, ohne Schlammrückhalt grob  $400$  bis  $500 \text{ g } NO_2^- \text{-N/m}^3_{\text{Reaktor1}} \text{/d}$ . Die Anlagen der ARA Bern und ARA Emmenspitz werden ohne Schlammrückhalt, aber mit Zugabe von Überschuss- oder Belebtschlamm in Höhe von täglich 1–2% des Volumens von Reaktor 1 zur Unterstützung der Nitrifikationsaktivität betrieben.

<sup>3</sup> Falls im Bereich von 1,5 bis 2 Tagen hydraulische Aufenthaltszeit betrieben wird, muss die Notwendigkeit eines Schlammrückhalts abgeklärt werden, da dies von der detaillierten Zusammensetzung des Faulwassers abhängt. Bei einem Schlammalter über 2 Tage war an den bisher getesteten Standorten kein Schlammrückhalt notwendig.

### pH-Korrektur

An den bisherigen Standorten war eine pH-Korrektur mit Lauge oder Säure nur bei Faulungen mit bedeutenden Mengen an Ko-Substrat erforderlich.

### Interne Rezirkulation

Eine Schlammrückführung von Reaktor 2 zu Reaktor 1 kann bei Leistungsverlust der AOB helfen, typischerweise durch toxischen Schock (in Pilotversuchen wurden bisher erhöhte Zulaufkonzentrationen an Feststoffen und Hydrauliköl getestet; *Phase 3 in Fig. 2*). Dies betrifft gemäss bisheriger Erfahrung primär Reaktor 1 aufgrund der höheren Beschickung mit Faulwasser. Da der Reaktor 2 meist mit weniger Faulwasser beschickt wird, wurde hier weniger Leistungsverlust beobachtet. Die suspendierte Biomasse kann zum Neustart von Reaktor 1 verwendet werden.

### Verfahrensführung mit minimalem Faulwasserstapel

Eine Verfahrensführung mit minimalem Faulwasserstapel (z.B. wenige Stunden Speicherkapazität) kann sinnvoll sein bei engen Platzverhältnissen oder falls kein isolierter Stapel vorhanden ist. Die Entstickung läuft in diesem Fall nur während des Betriebs der Schlammwässerung (z.B. 4 Tage pro Woche) und pausiert sonst. Um vom Normalbetrieb zum Pausieren zu ändern, wurden bisher folgende Betriebsparameter geändert:

- Die Belüftung wird in beiden Reaktoren auf ein Minimum reduziert, damit anaerobe Bedingungen im Reaktor mit Redox < -200 mV verhindert werden: Bei diesen Bedingungen kann sowohl die AOB- wie auch die Anammox-Population irreversibel gehemmt werden.
- Die Beschickung von Reaktor 2 mit Faulwasser bleibt eingeschaltet, um eine vollständige Oxidation des Ammoniums zu verhindern, da sonst auch bei schwacher Belüftung die Anammox-Biomasse dauerhaft hohen  $O_2$ -Konzentrationen ausgesetzt ist. Die Regelung der Beschickung muss vom pH-Signal auf  $NH_4^+$ -Konzentration gewechselt werden: Weil das  $NO_3^-$  innert 24 h abgebaut wird,<sup>4</sup> ändert sich die Zusammensetzung des pH-Puffers im

Reaktor bedeutend, was dazu führen kann, dass eine  $NH_4^+$ -Limitierung bei  $pH > 7,0$  eintritt.

### Durchgehende Beschickung

Falls ausreichend Stapelvolumen vorhanden ist für eine durchgehende Beschickung (z.B. auch über das Wochenende), kann die Abbauleistung der Anlage der anfallenden Menge Faulwasser angepasst werden. Dies geschieht, indem die Nitritionsleistung durch Mindern der Luftzufuhr reduziert wird. Als Erstes wird in der Regel die Belüftung von Reaktor 2 heruntergefahren, weil dadurch auch die Nitratkonzentration im Ablauf sinkt (bei schwacher Belüftung wird in zunehmend Masse  $NO_3^-$  zu  $NO_2^-$  heterotroph reduziert; das dabei gebildete  $NO_2^-$  wird per Anammox entstickt).

### Temperatur

Der Temperaturbereich von 25 bis 35 °C wurde als machbar getestet. Die Temperaturgrenzen wurden noch nicht ausgelotet: Denkbar ist, dass der Prozess auch bei tieferen Temperaturen mit etwas Leistungseinbusse stabil betrieben werden kann.<sup>5</sup>

### Überlauf von Reaktor 1 zu 2

Der Überlauf von Reaktor 1 zu Reaktor 2 kann unterschiedlich realisiert

<sup>5</sup> Bei der offenen einstufigen Anlage der ARA Thunersee sinkt die Temperatur im Winter bis zu 18 °C ab.

werden, um die Phasen ohne Zulauf zu Reaktor 2 zu überbrücken (Abbau von Nitrit, Sedimentation und Dekantation benötigen typischerweise 10 bis 25% der Dauer eines Batches):

- Bei ausreichend Freibord in Reaktor 1 kann dieser mit automatischem Schieber gestaut und so durchgehend beschickt und belüftet werden.
- Dasselbe kann anhand eines Zwischenpuffers zwischen Reaktor 1 und Reaktor 2 erreicht werden.
- Die Beschickung von Reaktor 1 wird gesperrt, während der Reaktor 2 ohne Beschickung betrieben wird.

## REFERENZANLAGEN

Tabelle 1 listet alle biologischen Entstickungsanlagen für Faulwasser der Schweiz auf. Im Vollmasstab laufen folgende Anlagen nach dem hier präsentierten Verfahrenskonzept:

- ARA Bern (Fig. 3) und ARA Emmenspitze haben 2017 und 2020 von einstufig auf zweistufig gewechselt und dadurch eine deutlich höhere Betriebsstabilität und im Fall der ARA Bern auch höhere Leistung erreicht.
- ZSA Pfannenstiel und ARA Werdhölzli haben 2021 den bestehenden Betrieb, soweit dies mit minimalen Investition möglich war, von einstufig in Richtung zweistufig modifiziert und dadurch die erhöhte Betriebsstabilität bestätigt.

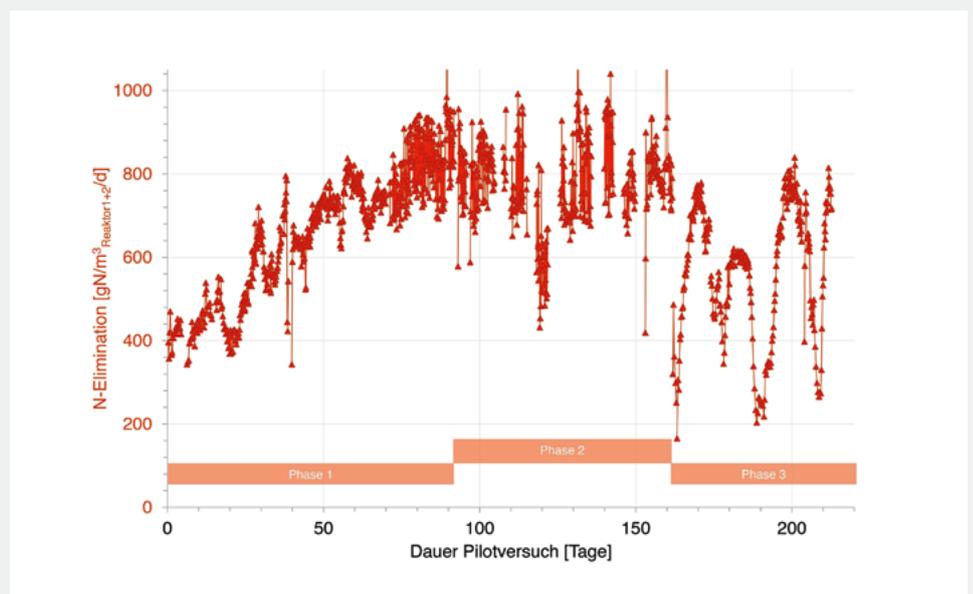


Fig. 2 Zeitlicher Verlauf der Entstickungsleistung während der Pilotierung (STEP Aire) des zweistufigen Verfahrens, gegliedert in drei Phasen:

Phase 1: Leistungssteigerung; Phase 2: Test der Betriebspausen während des Wochenendes; Phase 3: Testphase der Stabilität der AOB-Leistung mit unterschiedlichen toxischen Schocks.

<sup>4</sup>  $NO_3^-$  wird in der Regel heterotroph zu  $NO_2^-$  reduziert. Das gebildete  $NO_2^-$  wird dann via Anammox-Prozess entstickt.

Standort	Stand 2017: 15 Anlagen			Stand 2022: 14 Anlagen in Betrieb	
	Verfahren	Reaktor	Leistung	3 neue Anlagen in Planung oder Bau	Leistung
		m <sup>3</sup>	g N/m <sup>3</sup> /d	Verfahren	g N/m <sup>3</sup> /d
ARA Bazenhaid (Bazenhaid)	Nitrif./Deni., 1-stuf., suspend.	2 x 400	130 bis 260	2023: Pilotierung, Nitrif./Anx, 2-stuf., hybrid	Ziel: 750
ARA Bern (Bern)	Nitrif./Anx, 1-stuf., granuliert	2 x 800	120	2018: Umstellung auf Nitrif./Anx, 2-stuf., granuliert	240 bis 440
ARA Bülach-Furt (Bülach)	Nitrif./Deni., 1-stuf., suspend.	2 x 250	keine Angabe	Nitrif./Deni., 1-stuf., suspend.	190 bis 280
ARA Emmenspitz (Zuchwil)	Nitrif./Anx, 1-stuf., granuliert	2 x 350	250 bis 390	2019: Umstellung auf Nitrif./Anx, 2-stuf., granuliert	350 bis 420
ARA Falkenstein (Oensingen)	keine Anlage			in Planung, Nitrif./Anx, 2-stuf., hybrid	Pilot: 900
ARA Glarnerland (Bilten)	Nitrif./Anx, 1-stuf., granuliert	1 x 450	110 bis 370	Nitrif./Anx, 1-stuf., granuliert (unverändert)	470 bis 620
ARA Langmatt (Wildeggen)	keine Anlage			im Bau (IBS 2024), Nitrif./Anx, 2-stuf., hybrid	Pilot: 1100
ARA Limmattal (Dietikon)	Nitrif./Anx, 1-stuf., granuliert	2 x 250	20 bis 360	Nitrif./Anx, 1-stuf., granuliert (unverändert)	150 bis 280
ARA Niederglatt (Niederglatt)	Nitrif./Anx, 1-stuf., hybrid	1 x 110	100 bis 420	seit 2021 nicht mehr in Betrieb	
ARA ProRheno (Basel)	keine Anlage			in Planung, Nitrif./Anx, 2-stuf., hybrid	keine Angabe
ARA Schönau (Cham)	Nitrif./Anx, 1-stuf., suspend.	2 x 350	130 bis 420	Nitrif./Anx, 1-stuf., suspendiert (unverändert)	350
ARA St. Gallen-Au (St. Gallen)	Nitrif./Anx, 1-stuf., suspend.	2 x 300	40 bis 180	Nitrif./Anx, 1-stuf., suspendiert (unverändert)	150 bis 200
ARA Thunersee (Uetendorf)	Nitrif./Anx, 1-stuf., granuliert	1 x 700	450 bis 640	Nitrif./Anx, 1-stuf., granuliert (unverändert)	keine Angabe
ARA Werdhölzli (Zürich)	Nitrif./Anx, 1-stuf., suspend.	2 x 1400	230 bis 390	2021: teilweise Umstellung auf 2-stuf., suspend.	100 bis 200
IDA Foce Ticino (Gordola)	Nitrif./Anx, 1-stuf., hybrid	1 x 485	240 bis 500	Nitrif./Anx, 1-stuf., hybrid (unverändert)	keine Angabe
STEP Aire (Vernier)	SHARON/Deni., 2-stuf., suspend.	1700 + 800	400 bis 550	2023: Umstellung auf Nitrif./Anx, 2-stuf., hybrid	Pilot: 700
STEP de Roche (Roche)	Nitrif./Anx, 1-stuf., suspend.	1 x 450	190 bis 250	Nitrif./Anx, 1-stuf., suspend. (unverändert)	140 bis 160
ZSA Pfannenstiel (Oetwil am See)	Nitrif./Anx, 1-stuf., suspend.	1 x 320	300	2021: teilweise Umstellung auf 2-stuf., suspend.	150

Tab. 1 Liste der schweizerischen Anlagen zur biologischen Entstickung von Faulwasser mit Angabe der Entstickungsleistung im regulären Betrieb.

Leistung: Die Entstickungsleistung wird auf das gesamte Reaktorvolumen (Reaktor 1 + 2) bezogen.

Abkürzungen: 1-stuf.: einstufig; 2-stuf.: zweistufig; Hybrid: Biofilmträger und suspendierter Schlamm; IBS: Inbetriebsetzung; Pilot: erreichbare Leistung gemäss Pilotversuchen; Nitrif./Deni.: Nitrifikation und Denitrifikation mit Methanol; Nitrif./Anx.: partielle Nitrifikation und Anammox; suspend.: suspendierter Schlamm; Ziel: erforderliche Leistung für den Betrieb.

Quellen: Stand 2017 gemäss Betreiberangaben im Rahmen der Erfahrungsaustauschgruppe ERFAnammox; Stand 2022. Bei Anlagen im Vollmassstab: Leistung erfasst im Rahmen der N<sub>2</sub>O-Emissionsmessungen von Christoph Diezger (AWEL); bei den Pilotanlagen: Resultate der eigenen Pilotversuche.

Basierend auf den Ergebnissen der Pilotversuche, sind aktuell folgende Anlagen in Planung oder Bau: ARA Langmatt (insgesamt 2,3 Jahre Pilotversuche), ARA Falkenstein (6 Monate Pilotversuche) und STEP Aire (7 Monate Pilotversuche). Für die Weiterentwicklung des Verfahrens und der Prozessvarianten waren diese Pilotversuche massgebend.

Tabelle 1 und Figur 2 zeigen, dass bei einer zweistufigen Betriebsweise mit einer Entstickungsleistung im Bereich von 0,7 bis 1,1 kg N/m<sup>3</sup><sub>Reaktor1+2</sub>/d geplant werden kann. Dies bei einer Entstickung von 85 bis 90%, wobei Nitrat etwa die Hälfte des Stickstoffs im Ablauf ausmacht.

## ZENTRALE ASPEKTE DER PROZESSSTABILITÄT

Das Verhindern der Nitrit-Oxidation durch NOB ist die grösste Sorge der Betreiber von einstufigen Anlagen (Leistungsschwankungen einstufiger Verfahren in

Tab. 1). Da im Vollmassstab ungenügend genau belüftet werden kann, schwanken die O<sub>2</sub>-Konzentration im Reaktor zu stark: Bei zu hoher Belüftung können sich NOB bilden, die mit Anammox um das gebildete Nitrit konkurrieren (s. Box). Das Auswaschen einer NOB-Population aus einem einstufigen Reaktor ist in der Regel sehr langwierig, weil die Anammox-Biomasse ein hohes Schlammalter erfordert.<sup>6</sup> Hingegen ist dieses Problem bei der zweistufigen Betriebsweise gelöst: Im Reaktor 1 können NOB über tiefe Schlammalter ausgewaschen werden – bewährt beim Sharon®-Betrieb; im Reaktor 2 kann bei Bedarf die Belüftung abgeschaltet oder stark reduziert werden. Bei Pilotversuchen mit Schlammrückhalt über Lamellenabscheider im Re-

<sup>6</sup> Auf der ARA Niederglatt sowie auf der ZSA wurde der einstufige Betrieb mit Biofilmträger im Vollmassstab getestet, ohne dass dieses Problem gelöst werden konnte.

aktor 1 wurde bisher, trotz deutlichem Überschreiten des theoretisch erforderlichen Schlammalters für NOB bei 30 °C (2–4 Tage), kein Einwachsen der Nitrit oxidierenden Bakterien (NOB) beobachtet (die Nitratkonzentration blieb immer < 40 mg NO<sub>3</sub>-N/l im Ablauf von Reaktor 1). Somit sind neben dem Schlammalter weitere Mechanismen für die NOB hemmend. Entsprechend wird empfohlen, Reaktor 1 für einen kontrollierten Schlammabzug auszurüsten; es liegen aber noch ungenügend Erfahrungen vor betreffend das optimale Schlammalter.

Versuche mit gezielter Zugabe von Faulschlamm haben bestätigt, dass Feststoffe im Zentrat toxisch für AOB wirken, hingegen auf die im Biofilm vorliegende Anammox-Aktivität keine bedeutenden Auswirkungen haben. Dennoch weist die zweistufige Betriebsweise eine hohe Resilienz auf: Spitzen von 16 bis 46 g TS/l Feststoffgehalt im Zentrat während 24 h wurden innert Wochenfrist vollkommen

verkräftet (Phase 3 in Fig. 2). Weil der Verlust an AOB-Leistung grob proportional zur dosierten Menge Feststoff ist und die Erholung mit einer Rate erfolgt, die typisch für das AOB-Wachstum bei 30 °C ist (Verdoppelung alle 2–3 Tage), wird davon ausgegangen, dass die AOB irreversibel gehemmt werden und anschliessend neu gebildet werden.

Erwartungsgemäss trägt die Anammox-Biomasse im Biofilm ebenfalls zur Betriebsstabilität bei: Nitritspitzen bis zu 150 mgNO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N/l führen im Reaktor 2 zu höheren Entstickungsleistungen ohne spürbare Leistungshemmung der Anammox-Biomasse. Auch O<sub>2</sub>-Konzentrationen >2 mgO<sub>2</sub>/l im Reaktor 2 während eines Tages führten lediglich zu reversiblen Leistungseinbussen, die verschwinden, sobald wieder O<sub>2</sub>-Konzentrationen im üblichen Bereich vorliegen (0–1 mgO<sub>2</sub>/l).

Während der Pilotierung haben Fehler bei der Beschickung zu unüblichen pH-Werten geführt:

- Wird die Belüftung ohne Zulauf fortgesetzt, kann der pH-Wert bis unter 6,0 sinken. Dies führt zur reversiblen Hemmung der AOB: Mit einem Anheben des pH in den neutralen Bereich wird wieder die vorangehende Leistung erreicht.
- pH im Bereich von 8,0 bis 9,0 führen ebenfalls zu einer Leistungsminderung, vermutlich aufgrund der Ammoniakkonzentrationen von > 10 mgNH<sub>3</sub><sup>-</sup>-N/l. Dies kann bei zu hoher Beschickung eintreten oder bei Annahme von Ko-Substrat in die Faulung mit entsprechender Zusammensetzung.



Fig. 3 Anammox-Anlage der ARA Bern, die erste Schweizer Vollmassstabsanlage, die von der einstufigen Betriebsweise zur zweistufigen gewechselt hat und dadurch die höhere Betriebsstabilität bestätigte.

## DANK

Die an den Studien im Vollmassstab sowie im Pilotmassstab Beteiligten haben massgeblich dazu beigetragen, diese Arbeit zu realisieren. Bei der ARA Bern waren es *Adrian Fasel* und *Andreas Bütikofer*; bei der ARA Emmenspitz *Martin Jäggi* und *Roland Affolter*; bei der ARA Langmatt (AVRL) *Roman Bieri*, *Markus Bärtschi*, *Markus Plangger* und *Bruno Müller*; bei der ARA Falkenstein *Markus Bieli*, *Steven Meister* und *Stefan Kohler*; bei der ZSA Pfannenstiel *Hans Hess*; bei der ARA Werdhölzli *Nina Gubser* und *Roger Kohler*; bei der STEP Aire *Christian Zumkeller* und *Jérôme Grenard*; bei der ARA Niederglatt *Stephan Ramseyer*, *Christoph Zimmermann* und *Fabian Mosimann*.

Die Erfahrungsaustauschgruppe der Betreiber von Anammox-Anlagen (ERFAnammox) prägte mit ihrem offenen Austausch von Problemen und Lösungen die Ausrichtung dieser Arbeit. Namentlich sind dies: *Adrian Baumann*, *Klaus Biermann-Commerell*, *Andreas Bütikofer*, *Thomas Di Lorenzo*, *Adrian Fasel*, *Christian Fux*, *FredERIC Gindroz*, *Nina Gubser*, *Hans Hess*, *Martin Jäggi*, *Thomas Klaus*, *Roger Kohler*, *Andras Harangozo*, *Claudio Lehmann*, *Daniel Iten*, *Walter Meier*, *Moreno Mozzetti*, *Daniel Pfund*, *Paolo Rovati*, *Stefano Quarenghi*, *Adrian Raschle*, *Larissa Schöb*, *Peter Spohn*, *Denis Thonney*, *Samuel Twerenbold*, *Michael Wehrli*, *Christoph Zimmermann*, *Steffen Zuleeg*.

## FAZIT

Mit der hier beschriebenen Betriebsführung kann eine sehr gute Betriebsstabilität bei der biologischen Entstickung von Rückläufen aus der Schlammwässerung erreicht werden. Dies ergaben die Studien in Vollmassstabanlagen sowie Pilotversuche an sieben unterschiedlichen Standorten. Das Verfahren ist robust in Bezug auf ausserordentliche Betriebssituationen wie Schwankungen im Feststoffgehalt des Zentrats, Fehler bei der Beschickung oder überhöhte Belüftung.

Entstickungsleistungen von 0,7 bis zu 1,1 kgN/m<sup>3</sup><sub>Reaktor1+2</sub>/d als Zielwert werden heute geplant. Massgebend für eine hohe Gesamtleistung ist die Nitritbildung, die im zweistufigen Verfahren bei guter Versorgung mit Sauerstoff ohne ungewünschte Nitrit-Oxidation (erhöhte Nitratbildung) im ersten Reaktor betrieben werden kann. Die Anammox-Biomasse im zweiten Reaktor weist bei dieser Prozessführung stets eine deutliche Kapazitätsreserve auf. Der sichere Rückhalt der Anammox-Biomasse ist für die Betriebssicherheit von Bedeutung. Diese wird bei Inbetriebnahme über die Dauer von gegen sechs Monate aufgebaut.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Thomann, M. et al. (2022): Optimierte Stickstoffelimination, VSA-Tagung 2022, Kandersteg, mündliche Mitteilung
- [2] Lackner, S. et al. (2014): Full-scale partial nitritation/anammox experiences – an application survey. *Water Research*, Vol. 55, 292-303. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.02.032>
- [3] Dieziger, X. et al.: N<sub>2</sub>O-Emissionen aus Schweizer Faulwasserentstickungsanlagen, *Aqua & Gas*, in Vorbereitung
- [4] Kobler, B.; Wenzel, G. (2022): Technischer Bericht. Pilotexperiment RTO im Auftrag der ara region bern AG