

SCHLAMMGRANULIERUNG

ERFAHRUNGEN DER ARA NEUGUT

Das Wachstum von Fadenbakterien erschwert den Betrieb der knapp dimensionierten Nachklärbecken der ARA Neugut. Um das Problem zu beheben, wurden Hydrozyklone installiert. Trotz mässiger Granulierung (13% > 200 µm) wurde der Schlammvolumenindex um 37% gesenkt. Dadurch konnte die bislang notwendige Dosierung von Flockungsmitteln gestoppt, der Energieverbrauch um 23% gesenkt und gleichzeitig die Gesamtstickstoff-Entfernung bei über 70% gehalten werden.

Elizaveta Shilyaeva, Eawag/ARA Neugut

Alexandra Fumasoli, Hunziker Betatech AG; Bernhard Wett, ARA Consult

Nathalie Hubaux, ARA Neugut; Nicolas Derlon, Eawag

RÉSUMÉ

BOUES DENSIFIÉES: RETOUR D'EXPÉRIENCE À LA STEP DE NEUGUT

La prolifération de filaments rend l'exploitation de la décantation secondaire sous-dimensionnée délicate (Dübendorf ZH), nécessitant un dosage continu de floculants dans la biologie, dont l'efficacité diminue au fil des années malgré divers essais. Afin de trouver une solution durable, une étude pilote a été menée de juillet 2023 à mars 2025 afin d'évaluer le bénéfice des boues densifiées, formées via une sélection biologique et physique à l'aide d'hydrocyclones. Une densification partielle a été obtenue avec 13% de granules de plus de 200 µm et plus de 20% de granules de taille de 100-200 µm. Malgré des conditions opératoires non optimales (sélecteur partiellement anoxique, faible concentration en DCO soluble), la décantation s'est nettement améliorée avec une baisse moyenne de 37% de l'IVB₃₀ (moyenne 2025 à environ 130 ml/g). L'élimination de l'azote est restée stable malgré la réduction du RAS (de 200% à 60% de l'effluent d'entrée), la baisse des retours en nitrates étant compensée par l'aération intermittente. Les émissions de N₂O sont restées comparables à celles d'une ligne à boues activées conventionnelles.

L'énergie consommée par la biologie a diminué de 23% et le dosage de polymères a pu être arrêté. Les prochaines étapes viseront à optimiser le sélecteur biologique et à équiper toutes les lignes de traitement d'hydrocyclones. À terme, un fonctionnement de

HINTERGRUND

Die begrenzte Nachklärkapazität sowie das Wachstum von Fadenbakterien schwächen den reibungslosen Betrieb der Nachklärung der ARA Neugut (Dübendorf, Kanton Zürich) und machen eine kontinuierliche Dosierung von Flockungsmitteln in die Biologie notwendig. Im Laufe der Jahre verschlechterte sich die Situation trotz des Einsatzes verschiedener Polymere und Dosierungsstrategien zunehmend, was die Empfindlichkeit der Nachklärung gegenüber Regenereignissen erhöhte.

Um dieses Problem zu beheben, wurde zwischen Juli 2023 und März 2025 eine Pilotstudie durchgeführt, um das Potenzial der Schammgranulierung in der ARA Neugut zu testen. Ziel war es, die Absetzbarkeit des Belebtschlammes unter Beibehaltung der aktuellen Zulauffrachten zu verbessern und auf den Einsatz von Flockungsmitteln zu verzichten. Die Schammverdichtung, die auf der Bildung dichter Granulen durch eine kombinierte biologische und physikalische Selektion beruht, wurde als eine relevante Strategie identifiziert, um die Absetzbarkeit zu verbessern, die Dosierung von Polymeren zu reduzieren oder sogar zu stoppen und insgesamt den Betrieb der ARA Neugut zu verbessern.

Kontakt: N. Hubaux, nathalie.hubaux@neugut.ch

ÜBERSICHT ÜBER DIE ARA NEUGUT

Die ARA Neugut behandelt das Wasser von 105 000 EW bei einem durchschnittlichen Abfluss von 200l/s bei Trockenwetter.

Biologische Aufbereitung

Die ARA besteht aus 4 parallelen Strassen zur biologischen Aufbereitung, wobei jede Strasse ca. 25% des Zulaufs oder 50l/s pro Linie aufbereitet. Jede Strasse besteht aus 5 Becken: ein erstes unbelüftetes Becken mit einem mechanischen Rührwerk, das als «Selektor» bezeichnet wird, ein zweites bivalentes Becken mit einem Rührwerk und einem Belüftungssystem, gefolgt von drei aufeinanderfolgenden belüfteten Becken.

Die vier Strassen arbeiten völlig unabhängig voneinander: Die biologischen Becken, die Nachklärbecken und der Rücklaufschlamm (RLS) sind für jede Strasse spezifisch, wodurch eine Vermischung des Schlammes zwischen den Strassen verhindert wird. Die Rücklaufschlammmenge beträgt 100l/s pro Strasse, was etwa 200% der Abwassermenge entspricht. Diese hohe RLS-Rate führt zu einem hohen Nitratrücklauf (NO_3^-), wodurch eine Stickstoffentfernung von über 70% erreicht wird. Es gibt keine interne Rezirkulation.

Nachklärung

Der Betrieb der Nachklärung der ARA Neugut ist heikel. Aufgrund des begrenzten verfügbaren Platzes wurden die Nachklärungen knapp dimensioniert, was die hydraulische Sicherheitsmarge verringert und die Empfindlichkeit gegenüber Lastschwankungen erhöht. Ausserdem verschlechtert die an das Abwassersystem angeschlossene Lebensmittelindustrie die Nachklärung, indem sie das Wachstum von Fadenbakterien fördert, was zu SVI_{30} -Werten (Schlammvolumenindex, gemessen nach 30 Minuten Sedimentation) von über 200ml/g führt. Das deutet auf eine schlechte Schlammabsetzung hin. Um operative Probleme zu vermeiden, werden kontinuierlich Polymere in die Biologie dosiert (ca. 20-25 IBC/Jahr; IBC: *Intermediate Bulk Container*). Diese Massnahme verbessert jedoch nur teilweise die Absetzbarkeit des Schlammes und erhöht die Betriebskosten. Ausserdem ist es nicht wünschenswert, dass dem Wasser Chemikalien zugesetzt werden müssen, um die Trennung Biomasse/aufbereitetes Wasser zu verbessern.

PILOTSTUDIE

Eine der vier Strassen (Pilotstrasse) wurde mit einem Hydrozyklon ausgestattet. Dieser wurde auf der Strasse zur selektiven Entfernung des Überschussschlammes platziert. Ein Hydrozyklon selektioniert physikalisch zwischen kleinen, langsam absetzbaren Flocken und grösseren, verdichteten Granulen mit höherer Sinkgeschwindigkeit. Der Hydrozyklon ermöglicht somit eine selektive Entfernung der Flocken mit schlechter Sedimentationseigenschaft, während die gut sedimentierenden Granulen in die Biologie zurückgeführt werden. Durch diese kontinuierliche physikalische Selektion wird der Schlamm allmählich mit granulierter Biomasse angereichert, wodurch die Absetzung verbessert wird.

Der Einsatz von Hydrozyklonen allein führt nicht zu einer robusten Verdichtung des Schlammes. Vielmehr muss diese physikalische Selektion idealerweise mit einer biologischen Selektion einhergehen, welche die Bildung dichter Aggregate fördert, was wiederum Änderungen der Betriebsbedingungen der ARA erfordert. Zwei wichtige Anpassungen wurden vorgenommen: die Verringerung der Schlammrücklaufmenge und die Einführung einer intermittierenden Belüftung.

Reduzierung der RLS

Die angestrebte mikrobielle Selektion zielt auf die Auswahl langsam wachsender Bakterien wie PAO (polyphosphatanreichernde Bakterien) und GAO (glykogenanreichernde Bakterien) ab. Diese Bakterien wachsen nur unter sequentiellen anaerob-aeroben Regimen (*Feast/Famine-Regime*) - Bedingungen, die für die Bildung dichter Aggregate wie Granulen günstig sind. So wurde die RLS-Rate von 200% auf 60% des Zulaufs reduziert, was (I) den Nitratrückfluss in den Selektor verringerte und die Etablierung anaerober

Bedingungen im Selektor förderte, und (II) die Verdünnung organischer Substrate (z.B. chemischer Sauerstoffbedarf $\text{CSB}_{\text{gelöst}}$) im biologischen Selektor reduzierte.

Intermittierende Belüftung

In drei der vier belüfteten Becken wurde eine intermittierende Belüftung eingerichtet, um die Denitrifikation zu erhöhen, die Stickstoffelimination aufrechtzuerhalten und eine übermässige Belüftung zu vermeiden. Die Belüftung wurde dynamisch mit Hilfe von Online-Ammoniumsensoren gesteuert, wodurch die Belüftungsphasen in Abhängigkeit von der momentanen Belastung kontrolliert werden konnte.

Zwei zusätzliche Strassen wurden als Referenzlinien betrieben:

- die Strasse «Ref. int.» mit intermittierender Belüftung und reduziertem RLS (120%), aber ohne Hydrozyklon, und
- die Strasse «Ref. konst.» mit kontinuierlicher Belüftung und RLS = 200%.

Diese Strassen dienten dazu, die Effekte, die allein durch die Verringerung des RLS und die intermittierende Belüftung verursacht wurden, von den spezifischen Effekten der Verwendung des Hydrozyklons zu unterscheiden.

In allen drei Strassen (*Tab. 1*) wurden die Lachgasemissionen (N_2O) gemessen, um die potenziellen Auswirkungen der intermittierenden Belüftung und der Granulenbildung auf die Treibhausgasemissionen zu beurteilen. Schlammproben wurden regelmässig hinsichtlich der Grössenfraktionen ($<100\mu\text{m}$, $100-200\mu\text{m}$, $200-500\mu\text{m}$ und $>500\mu\text{m}$) analysiert, um die Granulierung zu verfolgen. Parallel dazu wurden die Abwasserqualitätsparameter in jeder der 3 Strassen überwacht, um die Auswirkungen von Betriebsänderungen auf die Gesamtleistung der Abwasserreinigung zu überprüfen.

Strasse	Hydrozyklon	Intermittierende Belüftung	RLS (Jan. 23 – März 25)	N ₂ O -Messungen
Pilot	Ja	Ja	60%	Ja
Ref. int.	Nein	Ja	120%	Ja
Ref. konst.	Nein	Nein	200%	Ja

Tab. 1 Details zu den Betriebsbedingungen in den verschiedenen Biologiestrassen. Die Strasse «Ref. konst.» blieb unverändert, während die Pilotstrasse mit einem Hydrozyklon, intermittierender Belüftung und reduziertem RLS betrieben wird.

SCHLAMMGRANULIERUNG

WACHSTUMSBEDINGUNGEN IM ANAEROBEN SELEKTOR

Die Schaffung strenger anaerober Bedingungen im Selektor mit einem hohen Gradienten für organische Substrate (gelöster CSB) wird häufig als wesentliche Voraussetzung für die mikrobielle Selektion und damit für die Granulierung des Schlammes angesehen. Die CSB-Konzentrationen im Ablauf des Selektors wurden daher alle zwei Tage analysiert. Die Verringerung des RLS-Durchsatzes in der Pilotstrasse führte aufgrund der geringeren Verdünnung tatsächlich zu einer höheren CSB-Verfügbarkeit am Eingang des Selektors. Die Gesamtverfügbarkeit von organischem Substrat blieb jedoch gering. Der durchschnittliche Gesamt-CSB des Abwassers betrug nach der Verdünnung mit RLS 238 mg/l, was einem F/M-Verhältnis (*food-to-microorganism ratio*) im biologischen Selektor von nur 0,5 bis 0,8 gCSB_{gelöst}/goTS/Tag (oTS: organische Trockensubstanz) entspricht. Dieses F/M-Verhältnis liegt deutlich unter den in der Literatur empfohlenen Werten für die Schlammgranulierung von ca. 1-2 gCSB_{gelöst}/goTS/Tag [1]. Darüber hinaus wurden am Eingang der Biologie teilweise Konzentrationen von bis zu 4 mg/l gelöstem Sauerstoff gemessen (aufgrund der Belüftung des Sandfangs), was die Schaffung anaerober Bedingungen im Selektor beeinträchtigte.

Am Ausgang des Selektors wurden der gelöste CSB und die Nitratkonzentrationen mithilfe von Stichprobenanalysen und einem Online-Sensor überwacht. Die Konzentrationen an gelöstem CSB nahmen über die gesamte Länge des Selektors ab, was den Abbau organischer Substrate belegt. Die Nitratkonzentrationen lagen dagegen häufig über der Nachweisgrenze, was darauf hindeutet, dass sich im Selektor nur vorübergehend streng anaerobe Bedingungen einstellen, was gewöhnlichen Heterotrophen einen Vorteil verschaffen und das Wachstum von PAO und GAO einschränken könnte [2].

Ein Rückfluss von Nitrat und Sauerstoff aus benachbarten belüfteten Bereichen wurde beobachtet, als die Belüftung in den ersten aeroben Becken ausgeschaltet war. Infolgedessen wurde regelmässig verhindert, dass sich anaerobe Bedingungen einstellen konnten.

GRANULENBILDUNG

Die Bildung von Granulen wurde mithilfe der Stereomikroskopie (Fig. 1) und durch Sieben der verschiedenen Aggregatgrößenfraktionen <100µm, 100-200µm, 200-500µm und >500 µm (Fig. 2) beurteilt. Mikroskopische Beobachtungen der Schlammfraktion 200-500µm aus der Pilotstrasse zeigten kompakte, kugelförmige Granulen mit glatter Oberfläche. In den beiden Referenzstrassen wurden keine Granulen beobachtet. Auch die ungesiebten Bilder des Schlammes aus

der Pilotstrasse wiesen auf dichtere und rundere Aggregate hin als in den beiden Strassen «Ref. int.» und «Ref. konst.». Insbesondere die Schlammfraktion 100-200µm der Pilotstrasse wies eine grosse Anzahl von Mikrogranulen auf, während die Kontrollstrassen im gleichen Grössenbereich Flocken mit heterogener Struktur zeigten (Fig. 1).

Die Fraktion der Granulen >200µm stieg in der Pilotstrasse langsam, aber stetig an und erreichte im Mai 2025 13% (bezogen auf Trockensubstanz, TS), während diese

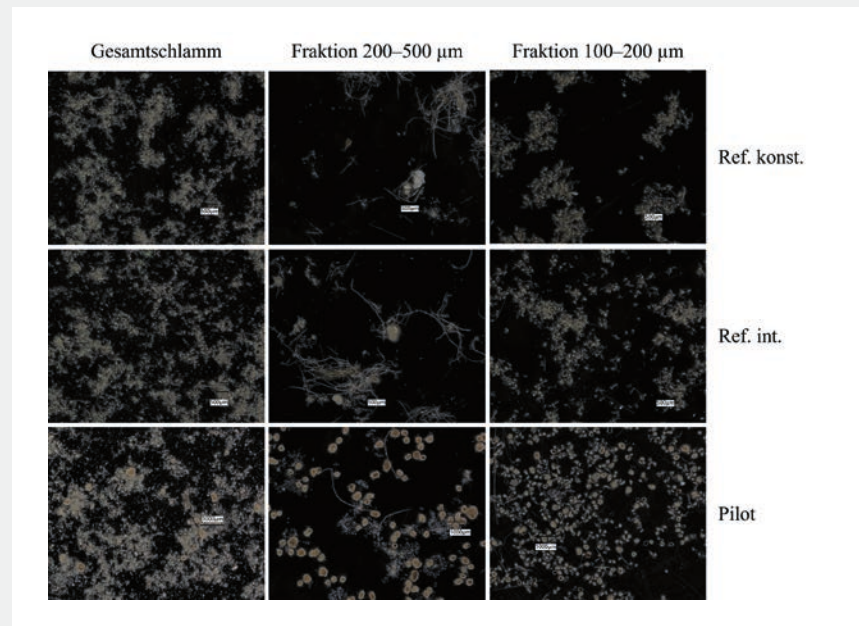


Fig.1 Mikroskopische Aufnahmen des Gesamtschlammes sowie der Fraktionen 200-500µm und 100-200µm in der Pilotstrasse sowie der Strassen «Ref. int.» und «Ref. konst.».

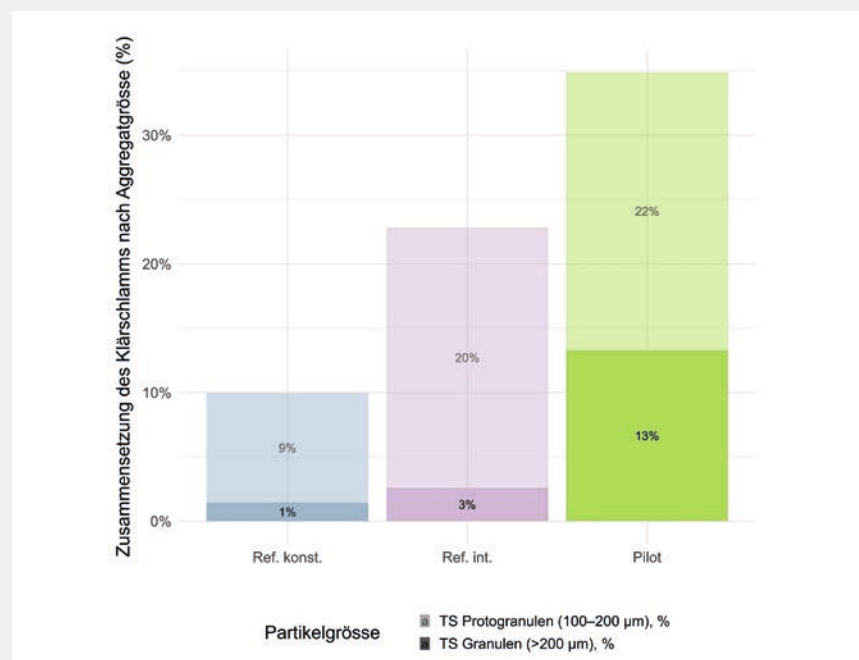


Fig.2 Feststofffraktionen in den Bereichen 100-200µm und 200-500µm, gemessen in den drei Aufbereitungsstrassen im Mai 2025.

Fraktion in den beiden Kontrollstrassen vernachlässigbar blieb (~ 2,5% bezogen auf TS). Die Fraktion 100-200µm machte 22% des Schlammes in der Pilotstrasse aus (Fig. 2) und bestand hauptsächlich aus Mikrogranulen (Fig. 1). In der Strasse «Ref. int.» wurde eine ähnlich grosse Fraktion (20%) beobachtet, die jedoch hauptsächlich aus grossen Flocken bestand. In der Strasse «Ref. konst.» war diese Fraktion viel kleiner (9%) und bestand ausschliesslich aus Flocken (wie in der Strasse «Ref. int.»).

Obwohl der Anteil an Granulen geringer blieb als in anderen granulierten Schlamm-Systemen in der Schweiz (z.B. bis zu 45% in Gossau [3, 6]), zeigen unsere Ergebnisse, dass die Bildung von Granulen auch unter ungünstigen Betriebsbedingungen möglich ist.

ABSETZEIGENSCHAFTEN DES SCHLAMMS

Die Absetzeigenschaften des Schlammes wurden über SVI_{30} -Messungen verfolgt, die zwei bis drei Mal pro Woche durchgeführt wurden. In der Pilotstrasse wurde eine deutliche Verbesserung der Absetzbarkeit des Schlammes beobachtet, und das trotz der relativ geringen Verdichtung des Schlammes. Historische Daten zeigen einen allmählichen Anstieg des SVI_{30} von 150 ml/g auf > 200 ml/g zwischen 2017 und 2023, und das trotz der kontinuierlichen Zugabe von Flockungsmitteln (Fig. 3). Während des Projektzeitraums (Juli 2023 bis März 2025) schwankte der SVI_{30} der Pilotanlage als Reaktion auf Schwebstoffschwankungen, Regenereignisse und betriebliche Anpassungen, stabilisierte sich aber schliesslich bei Werten von unter 100 ml/g bei einer Bio-

massekonzentration von etwa 2,5 g/l. Der Jahresmittelwert des SVI_{30} des Schlammes aus der Pilotstrasse lag im Jahr 2025 bei etwa 130 ml/g, verglichen mit über 200 ml/g in der kontinuierlich belüfteten Referenzstrasse. Insgesamt wurde im laufenden Jahr 2025 eine durchschnittliche Reduktion von 37% erreicht, während die Zugabe von Flockungsmitteln in der Pilotstrasse vollständig eingestellt werden konnte. In beiden Referenzstrassen blieb der SVI_{30} in den Jahren 2024 und 2025 trotz der kontinuierlichen Zugabe von Flockungsmitteln in der Biologie bei rund 200 ml/g. Es ist zu beachten, dass die Daten für 2025 nur den Zeitraum Januar bis August abdecken und eine Verschlechterung des SVI_{30} der Referenzstrassen während des Herbstes erwartet wird, was die in der Pilotstrasse beobachtete Verringerung weiter verstärken würde.

BETRIEBS- UND UMWELTAUSWIRKUNGEN

ENTFERNUNG VON GESAMTSTICKSTOFF

Die Entfernung von Gesamtstickstoff N_{tot} wurde über die Analyse von 24-Stunden-Durchschnittsproben bewertet, die am Ein- und Ausgang jeder biologischen Aufbereitungsstrasse entnommen wurden. Eine durchschnittliche N_{tot} -Elimination von 70-75% wurde über alle Strassen hinweg beobachtet (Fig. 4). Die 2 Strassen mit intermittierender Belüftung betrieben

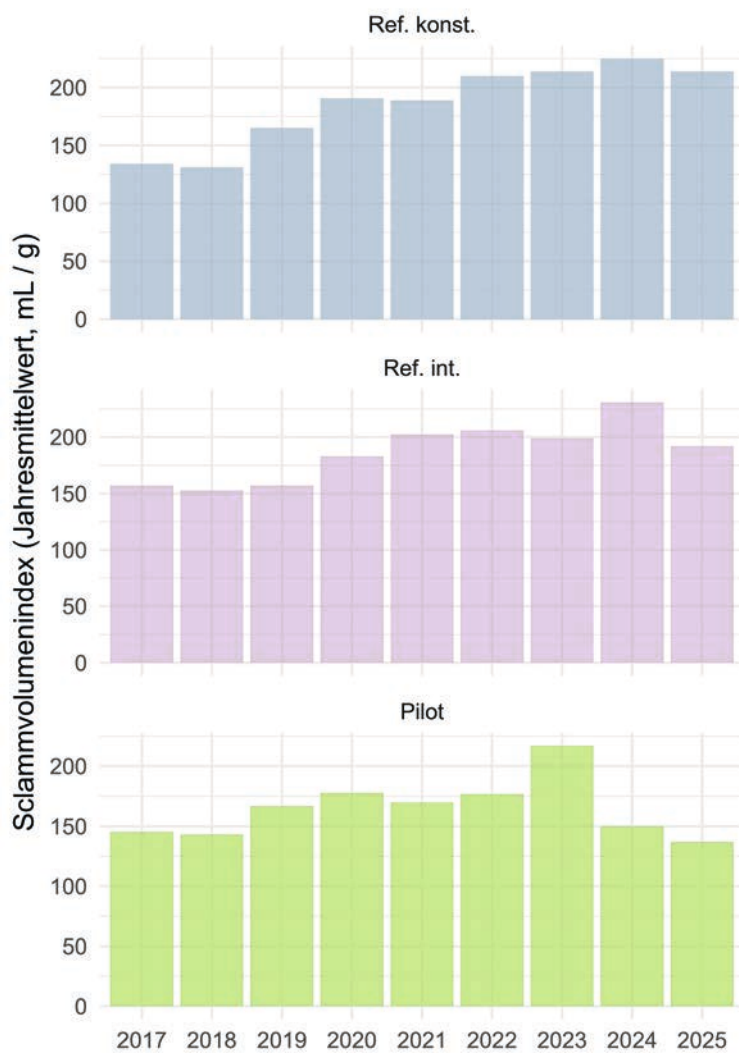


Fig.3 Jährliche Entwicklung des SVI_{30} zwischen 2017 und 2025 in der Pilotstrecke und den Referenzstrecken. Im Jahr 2025 wurde nur der Zeitraum Januar-August betrachtet.

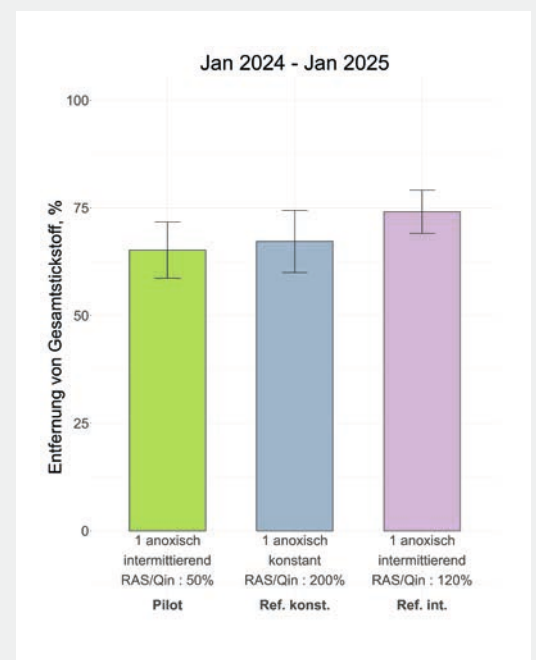


Fig. 4 Entfernung von Gesamtstickstoff (N_{tot}) in den drei Aufbereitungsstrassen.

mit identischer Belüftungskontrolle (Belüftung eingeschaltet für $\text{NH}_4^+\text{-N} > 5 \text{ mg/l}$ und ausgeschaltet für $\text{NH}_4^+\text{-N} < 2 \text{ mg/l}$, Online-Messung im 3. Becken).

Die Stickstoffelimination in der Pilotstrasse war ähnlich wie diejenige in der Strasse «Ref. konst.». In der Strasse «int. Ref.» wurde eine bessere Elimination beobachtet, was darauf hindeutet, dass ein hoher RLS (120%) in Kombination mit einer intermittierenden Belüftung die Denitrifikation fördert und die Stickstoffelimination verbessert. Die ähnliche Entfernung der Pilot- und «Ref. konst.»-Strassen lässt den Schluss zu, dass die Verringerung der Denitrifikation aufgrund der geringeren Nitratrückführung (als Folge der Verringerung des RLS) durch die erhöhte Denitrifikation in den Bereichen, die mit intermittierender Belüftung betrieben werden, vollständig kompensiert wird. Es ist jedoch anzumerken, dass die Optimierung der für die Belüftungsregelung verwendeten Sollwerte eine entscheidende Rolle für die Stickstoffelimination spielt, und dass dieser Aspekt im Rahmen unserer Studie nicht angeschaut wurde.

N₂O-EMISSIONEN

Die N₂O-Konzentrationen in der Abluft der Biologie wurden eineinhalb Jahre lang mit dem von der Eawag [4] entwickelten *Noros*-System überwacht, das aus 12 Hauben bestand, die an den drei Aufbereitungsstrassen installiert waren. Die maximal gemessenen N₂O-Konzentrationen betrugen 335 ppm in der Pilotstrasse, 245 ppm in der Strasse

«Ref. int.» und 200 ppm in der Strasse «Ref. konst.». In der Pilotstrasse waren die N₂O-Konzentrationen während der Belüftungsphasen generell am höchsten mit einem allmählichen Anstieg während der ersten 1 bis 2 Belüftungsstunden.

Die täglichen N₂O-Frachten wurden abgeschätzt, indem die N₂O-Konzentration im Abgas mit dem Luftstrom des entsprechenden belüfteten Beckens multipliziert und diese Werte für jede Strasse aufsummiert wurden. Der Luftstrom jedes Beckens wurde entweder direkt mit einem *LumA*-Sensor [5] gemessen oder mithilfe eines multivariaten Regressionsmodells geschätzt. Anschliessend wurden die Emissionsfaktoren (EF) im Verhältnis zur eingehenden Gesamtstickstoffbelastung berechnet (Fig. 5). Aufgrund der geringen Verdichtung und der niedrigen Schwebstoffkonzentration in der Pilotstrasse spiegeln die gemessenen N₂O-Emissionen hauptsächlich den Einfluss der Betriebsbedingungen wider, d.h. des reduzierten RLS und der intermittierenden Belüftung. Eindeutig negative Auswirkungen dieser Betriebsbedingungen auf die N₂O-Gesamtemissionen wurden nicht beobachtet. Die höheren N₂O-Konzentrationen in der Abluft der Pilotstrasse werden durch eine Verringerung des Strippings im Zusammenhang mit der intermittierenden Belüftung ausgeglichen, sodass die Gesamtemissionsfaktoren mit denen der Referenzstrassen vergleichbar bleiben. Der Medianwert des EF der Pilotstrasse (0,65%) war somit mit dem der Strasse «Ref. konst.» vergleichbar (0,57%). Diese

Ergebnisse legen nahe, dass, obwohl die intermittierende Belüftung und die Verringerung des RLS die kurzfristige Variabilität der N₂O-Emissionen (insbesondere die Intensität der Spitzen) erhöhen können, die Gesamtemissionsfaktoren in allen Strassen niedrig blieben. Es ist jedoch erforderlich, diese Ergebnisse in zukünftigen Kampagnen zur Messung der N₂O-Emissionen in Systemen mit stark granuliertem Schlamm zu bestätigen. Es wird auch wichtig sein, Systeme zu charakterisieren, die bei hohen TS-Konzentrationen betrieben werden und eine erhöhte betriebliche Flexibilität bieten können, was eine verbesserte Nitrifikation und weitergehende Stickstoffentfernung zur Folge hat und damit allenfalls eine weitere Reduzierung der N₂O-Emissionen ermöglicht.

ENERGIEEINSPARUNG

Der durchschnittliche Energieverbrauch der verschiedenen biologischen Aufbereitungsstrassen wurde ausgewertet. Dieser umfasst die Energie, die für die Belüftung und das Pumpen benötigt wird (Pumpen des Schlammes zwischen dem 3. (EG) und 4. (OG) belüfteten Becken). Die Pilotstrasse verbraucht am wenigsten Energie, gefolgt von der Strasse «Ref. int.» und dann der Strasse «Ref. konst.». Insgesamt wurde der Energieverbrauch in der Pilotstrasse im Vergleich zur Strasse «Ref. konst.» um 23% gesenkt. Der Belüftungsbedarf war in allen Strassen ähnlich, aber die Pumpenergie wurde in der Pilotstrasse aufgrund des geringeren RLS erheblich reduziert. Das Fehlen zusätzlicher Energieeinsparungen durch die intermittierende Belüftung lässt sich auf die hohen Energiespitzen zurückführen, die beim Wiederanfahren der Belüftung beobachtet wurden. Es ist wahrscheinlich, dass eine optimierte Einstellung der Betriebsparameter zusätzliche Energieeinsparungen ermöglichen würde.

DOSIERUNG DES FLOCKUNGSMITTELS

Nach dem markanten Beginn der im September 2024 beobachteten Granulierung und der Verminderung des SVI_{30} wurde eine schrittweise Reduzierung der Flockungsmitteldosierung in der Pilotstrasse bis zu ihrer vollständigen Abschaltung vorgenommen, während die Dosierung in den Referenzstrassen konstant blieb. Es ist wichtig zu betonen, dass die vollständige Einstellung der Poly-

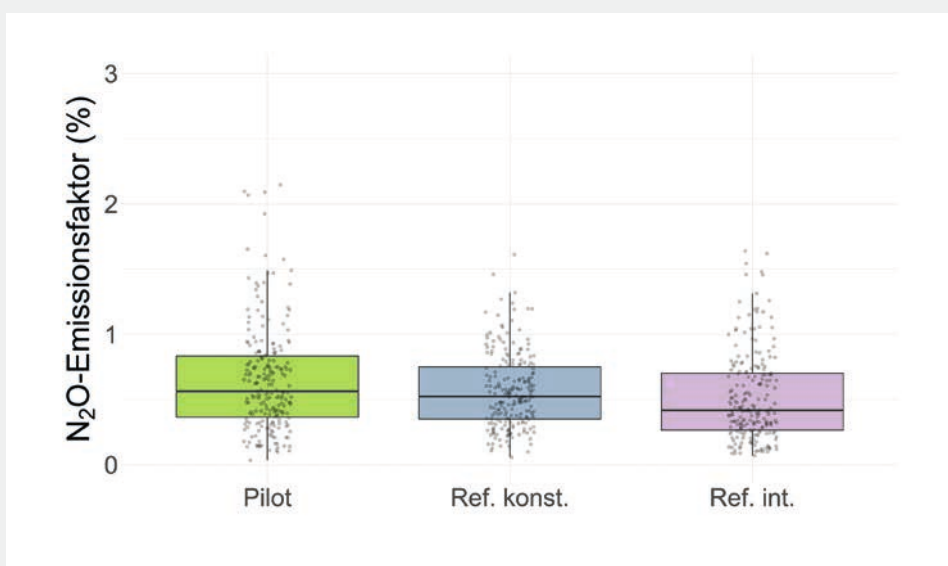


Fig. 5 Lachgas-Emissionsfaktoren in den Abgasen der biologischen Reaktoren der ARA Neugut, ausgedrückt als Prozentsatz der eingehenden Gesamtstickstoffbelastung der einzelnen Strassen.

merdosierung die Absetzbarkeit des Schlammes in der Pilotstrasse nicht beeinträchtigte, was bestätigt, dass die Verbesserung der Absetzbarkeit durch die biologische Granulierung allein trotz der begrenzten Granulenfraktion $>200\mu\text{m}$ aufrechterhalten wurde. Der Verzicht auf die Dosierung von Flockungsmitteln bietet sowohl ökologische als auch ökonomische Vorteile. Wenn diese Massnahme auf alle vier Aufbereitungsstrassen der ARA Neugut ausgedehnt würde, könnten jährlich 20 bis 25 m^3 Chemikalien eingespart werden, die in das Wasser gelangen. Diese Ergebnisse unterstreichen, dass die Schlammgranulierung eine nachhaltige Alternative zur chemischen Flockung ist.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Unsere Studie zeigt, dass die Schlammgranulierung durch kombinierte Strategien aus physikalischer (Hydrozyklon) und mikrobieller Selektion in grossem Massstab in der Abwasserreinigung eingesetzt werden kann. Trotz mehrerer betrieblicher Herausforderungen, insbesondere innerhalb des biologischen Selektors, zeigte die Pilotstrasse der ARA Neugut eine deutliche Verbesserung der Schlammabsetzbarkeit sowie eine signifikante Reduzierung des Energie- und Chemikalienverbrauchs. Aufgrund ungünstiger Bedingungen im biologischen Sektor (teilweise anoxische statt streng anaerober Bedingungen, begrenzte Verfügbarkeit von organischem Substrat usw.) wurde eine partielle Verdichtung des Schlammes erreicht: 13% in der $>200\mu\text{m}$ -Fraktion und mehr als 20% Mikrogranulen in der 100-200 μm -Fraktion. Diese partielle Verdichtung verbesserte jedoch die Absetzeigenschaften erheblich, wobei der SVI_{30} im laufenden Jahr 2025 um 37% reduziert wurde.

Die vollständige Stickstoffentfernung wurde in der Pilotstrasse auf einem ähnlichen Niveau wie in der Kontrollstrasse mit kontinuierlicher Belüftung gehalten ($>70\%$), trotz der Verringerung des Nitratrückflusses in Verbindung mit einem niedrigeren RLS-Durchsatz, der durch die intermittierende Belüftung kompensiert wurde. Die auf den Stickstoffeintrag normierten N_2O -Emissions-

faktoren waren vergleichbar mit denen, die in der Strasse mit konstanter Belüftung gemessen wurden, und insgesamt sehr niedrig (Medianwert: 0,65% in der Pilotstrasse)

Eine Reduzierung des Energieverbrauchs der biologischen Reinigung um 23% wurde erreicht, hauptsächlich aufgrund des geringeren Pumpens in die obere Stufe als Folge des geringeren RLS-Durchsatzes. Die verbesserte Absetzbarkeit ermöglichte es auch, die Dosierung von Flockungsmitteln vollständig einzustellen ohne negative Auswirkungen auf den SVI_{30} . Insgesamt wird geschätzt, dass die Schlammverdichtung eine jährliche Einsparung von rund 180 000 Franken bedeuten könnte.

AUSBLICK: WEITERE VERBESSERUNGEN

Weitere Verbesserungen zur Verstärkung der Granulierung werden in Betracht gezogen:

- Einleiten von Abwasser und Vermischung mit dem Rücklauf des Hydrozyklons/RLS vor dem Selektor, Einleiten am Boden des Selektors, eventuell kombiniert mit einem intermittierenden Rühren [6]
- Reduzierung des Sauerstoffeintrags in den Selektor, indem die Belüftung des Sandfangs optimiert und der Rückfluss von Sauerstoff und Nitrat aus dem ersten belüfteten Becken in den Selektor begrenzt wird.
- Reduzierung der Vorfällung, um die für die biologische Selektion verfügbare CSB-Menge zu erhöhen, falls von einer intermittierenden Mischung begleitet, die die Hydrolyse fördert.

Diese Massnahmen sollten eine robustere Granulierung fördern, die eine grössere betriebliche Flexibilität bietet (z.B. mehr anoxisches Volumen) und eine verbesserte Reinigungsleistung.

Auf der ARA Neugut umfassen die nächsten Schritte die Installation von Hydrozyklonen und die Erweiterung der RLS-Reduktion mit intermittierender Belüftung auf allen vier Strassen, die Ausrüstung auf Rührwerke mit grösserer Kapazität und direkte Zuführung des RLS mit dem Zulauf.

DANKSAGUNG

Unser aufrichtiger Dank gilt allen Mitarbeitern der ARA Neugut, deren Engagement und Professionalität für den Erfolg dieses Projekts von entscheidender Bedeutung waren.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Regmi, P. (2024): *Advancement in continuous-flow densified sludge system design and operation (Project DRPT-5130)*. The Water Research Foundation. Retrieved from <https://www.waterrf.org/research/projects/advancement-continuous-flow-densified-sludge-system-design-and-operation>
- [2] Layer, M. et al. (2019): *Organic substrate diffusibility governs microbial community composition, nutrient removal performance and kinetics of granulation of aerobic granular sludge*. *Water Research* 4: 100036. <https://doi.org/10.1016/j.wroa.2019.100036>
- [3] Rérolle, M. (2023): *Retrofitting conventional activated sludge WWTPs with hydrocyclones to extend their lifetime by densifying sludge*. Master thesis, EPFL & Eawag; collaboration with Hunziker Betatech and Gossau + Laufacker WWTPs
- [4] Gruber, W.; Joss, A. (2021): *Off-gas monitoring system for wastewater treatment (Version 1.0) [Data set]*. Eawag: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology. <https://doi.org/10.25678/0003WD>
- [5] Biolley, L.; Braun, D.; von Känel, L. (2025): *Gerätebeschreibung: Technische Beschreibung der Luftmengenmessung für Abluftmonitoring auf ARA (LumA)*. ETH Zürich, Report. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000736765>
- [6] Erni Cassola, G. et al. (2026): *Schlammgranulierung auf Schweizer Kläranlagen*. *Aqua & Gas* 2/26: 52-58

> SUITE DU RÉSUMÉ

la STEP à une concentration en boues plus élevées permettra peut-être d'améliorer l'élimination de l'azote.