



SAUERSTOFF – TREIBSTOFF FÜR DIE NITRIFIKATION

PROZESSORIENTIERTE ERFASSUNG/INTERPRETATION VON DATEN IN BIOLOGISCHER ABWASSERREINIGUNG

Sauerstoff ist ein entscheidender Prozessparameter in der biologischen Abwasserreinigung und stellt einen Schlüssel bei der Optimierung der biologischen Stufe dar. Zudem können Sauerstoffmessungen zur Vertiefung der Prozesskenntnis beitragen, wobei die eingesetzten Online-Sensoren langzeitstabil und einfach zu warten sind. Bedingung für die Dateninterpretation ist eine robuste, den Prozess abbildende Sauerstoffregelung.

Philipp Weber; Luzia von Känel; Daniel Braun, ETH Zürich, IfU – Umweltlabor*

RÉSUMÉ

OXYGÈNE – CARBURANT DE NITRIFICATION SAISIE ET INTERPRÉTATION ORIENTÉES SUR LE PROCESSUS DE DONNÉES ISSUES DU NETTOYAGE BIOLOGIQUE DES EAUX USÉES

L'extraction d'ammonium par nitrification est l'un des principaux objectifs de l'épuration des eaux usées en Suisse. La nitrification étant le processus d'extraction le plus lent au niveau biologique, la capacité d'une STEP dépend souvent de sa capacité de nitrification. Celle-ci dépend largement de la capacité et du réglage de la ventilation. En effet, l'extraction d'ammonium nécessite une quantité considérable d'oxygène et le processus de nitrification dépend de la concentration d'oxygène présente dans les réacteurs. L'oxygène constitue donc le paramètre central de l'optimisation de l'étape biologique: d'un côté, la nitrification est souvent limitée par l'apport d'oxygène en cas de charge; de l'autre, l'injection d'oxygène par l'installation et son réglage sont directement ajustables. L'injection d'oxygène devrait être optimisée en vue d'améliorer la technique du processus, mais aussi parce que la ventilation est un consommateur d'énergie déterminant du nettoyage biologique des eaux usées.

Sur la base de mesures effectuées à la STEP de Schönau, il a été constaté que la concentration en oxygène varie fortement selon les bassins, ce qui résulte pour une part de la variabilité de la pollution; d'autre part, les données relatives à l'oxygène ont permis de constater que l'aération des bassins était très irrégulière, ce

EINLEITUNG

Beim Betrieb von Abwasserreinigungsanlagen (ARA) wird parallel eine Vielzahl an Optimierungszielen verfolgt [1]. Einerseits werden Qualitätsziele für den Ablauf der Kläranlage angestrebt, andererseits sollen die dabei eingesetzten Betriebsmittel und Energie in einer sinnvollen Weise gering gehalten werden, und dies unter Gewährleistung der Betriebssicherheit zu jedem Zeitpunkt. Der Sauerstoffeintrag in der biologischen Stufe mittels Zufuhr von verdichteter Luft hat einen direkten Einfluss auf eine Reihe dieser Optimierungsziele: auf den Energieverbrauch [2] und die Betriebssicherheit der ARA, auf den Abbau des organisch gebundenen Kohlenstoffs, den Abbau des Ammoniums durch die Nitrifikation, die Reduktion von Nitrit durch Erreichen einer vollständigen Nitrifikation, die Elimination des Stickstoffs unter Abwesenheit von Sauerstoff sowie auf die Minimierung von Lachgasemissionen [3]. Daher haben auch die anlagentechnischen Bestandteile der Belüftungseinrichtung und die Regelung der Sauerstoffzufuhr einen wesentlichen Einfluss auf den Ablauf der biologischen Prozesse und somit auf die erwähnten Optimierungsziele. Letztlich hängen sehr relevante übergeordnete Eigenschaften wie die Gesamtkapazität der biologischen Stufe oder die Überwachbarkeit der ARA mit dem Sauerstoffeintrag zusammen. Besonders die Nitrifikation, die

* Kontakt: philipp.weber@ifu.baug.ethz.ch

den sauerstoff- und zeitintensivsten Abbauprozess darstellt, ist massgebend für die Kapazität einer ARA in der Schweiz.

PFlichtenHEFT DER BELÜFTUNGSREGELUNG

Die Hauptanforderung an eine Regelung ist, dass sie in ihrem Verhalten robust ist. Hier ist damit gemeint, dass das Verhalten der Stell- und Regelgrössen einerseits nicht oszilliert und andererseits kein zu ausgeprägtes Eigenleben aufweist oder es unter bestimmten Umständen entwickelt. Liegt diese Robustheit vor, bildet die Regelung indirekt den geregelten Prozess ab und liefert somit zusätzlich zur Schaffung von Prozessbedingungen wertvolle Informationen über den Prozess selbst. Zum Beispiel wird die geförderte Luftmenge, welche geregelt wird, in ihrem

zeitlichen Verlauf demjenigen der aktuellen Last folgen. Liegt diese Robustheit jedoch nicht oder nur beschränkt vor, wird das Eigenleben der Regelung die Informationen über den biologischen Prozess teilweise oder vollständig überdecken. Zudem wird der Prozess an sich durch die Eigenschaften der Regelung beeinflusst.

SAUERSTOFFDATEN VON VIER ARA

Vergleicht man aufgezeichnete Sauerstoffsignale von verschiedenen ARA, zeigt sich figurativ ein stark variierendes Bild. *Figur 1* bildet gemessene Sauerstoffkonzentrationen in vier Kläranlagen des Schweizer Mittellandes ab, wobei es sich bei der dargestellten Zeitspanne um denselben Trockenwetter-

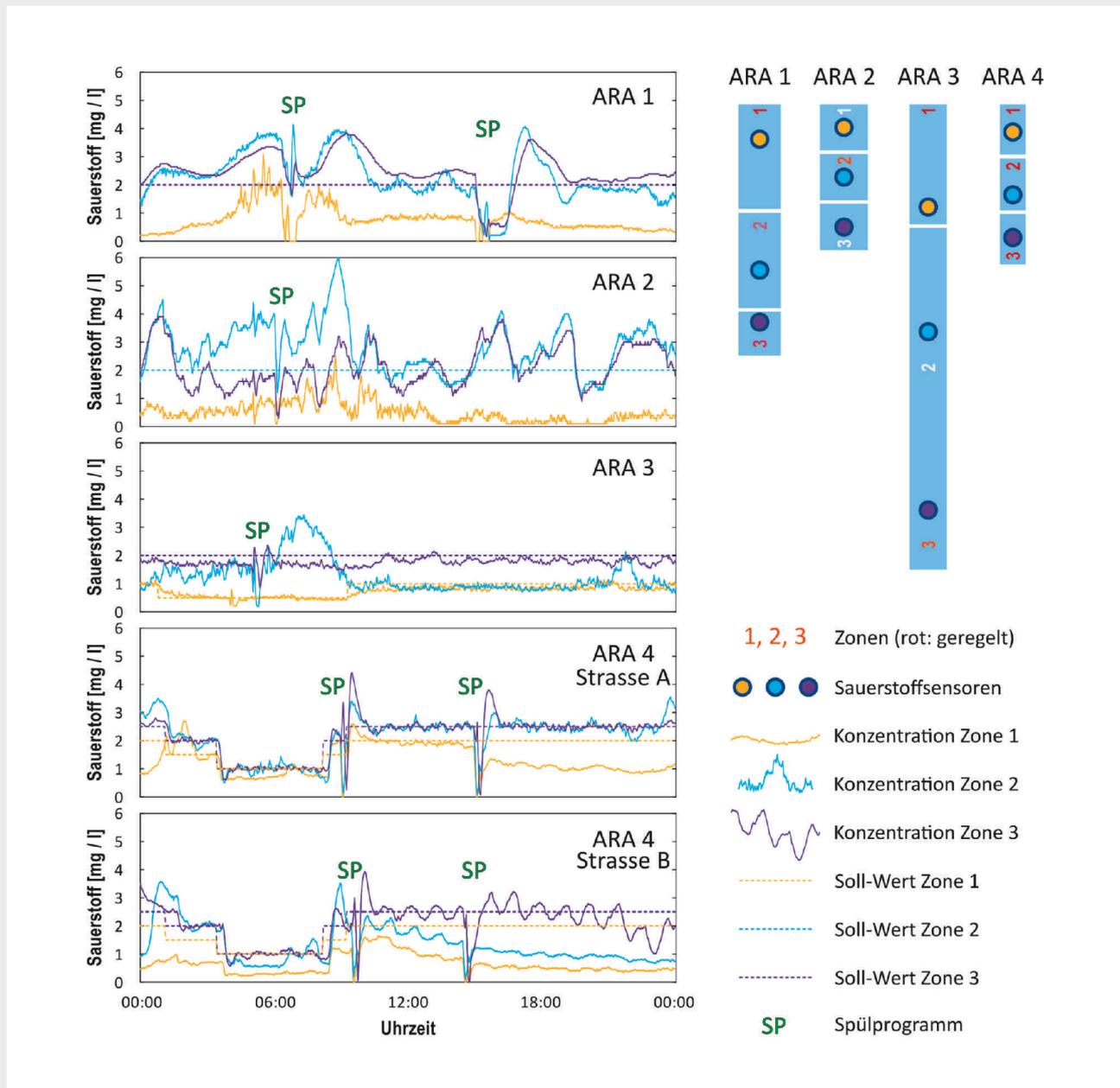


Fig. 1 Sauerstoffmessungen von vier verschiedenen Abwasserreinigungsanlagen im Vergleich (10. September 2015, Trockenwetter). Die verschiedenen Zonen einer Biologie weisen oft dieselben Sollwerte auf, wie zum Beispiel alle drei Zonen der ARA 1. Bei den ARA 3 und 4 werden die Sauerstoffsollwerte abhängig von der Belastung der Anlage angepasst, zudem ist der sogenannte Gleitdruckregler implementiert [4, 5]
Mesures de l'oxygène de quatre stations d'épuration différentes, comparaison (10 septembre 2015, temps sec) Les diverses zones d'une biologie présentent souvent les mêmes objectifs, comme c'est par exemple le cas des trois zones de la STEP 1. Pour ce qui est des STEP 3 et 4, les objectifs en termes d'oxygène sont adaptés en fonction de la charge de l'installation; de plus, un adaptateur est ajouté [4, 5]

tag (10. September 2015) handelt. Die Sauerstoffsignale lassen sich insofern vergleichen, dass alle vier ARA ein belüftetes Volumen aufweisen, das sich in drei Zonen unterteilen lässt. Die Grössenverhältnisse der Beckenvolumina, die Positionierung der Sauerstoffsensoren und an welchen Punkten die Sauerstoffkonzentration geregelt wird, ist ebenfalls in der *Figur 1 (oben rechts)* dargestellt.

Es zeigt sich, dass es in der Praxis nicht trivial ist, eine konstante Sauerstoffkonzentration im Belebtschlammbecken zu erreichen, und dass die Abweichungen vom Sollwert ein unterschiedliches Erscheinungsbild aufweisen. Letzteres deutet auf die vielfältigen Ursachen für die unterschiedlichen Konzentrationsverläufe hin. Dies wird im übernächsten Kapitel genauer besprochen.

SAUERSTOFF – DER TREIBSTOFF FÜR DIE NITRIFIKATION

Zunächst soll aufgezeigt werden, dass Sauerstoff neben den nitrifizierenden Bakterien im Belebtschlamm der Schlüssel für den Ablauf der Nitrifikation ist. Bei der Nitrifikation oxidieren nitrifizierende Bakterien das im Abwasser vorhandene Ammonium unter Verwendung von Sauerstoff in einem ersten Schritt zu Nitrit und in einem zweiten Schritt, ebenfalls Sauerstoff verbrauchend, zu Nitrat. Dieser Prozess benötigt, wie auch die Oxidation der oxidierbaren organischen Kohlenstoffverbindungen (CSB), eine beträchtliche Menge Sauerstoff. Jedoch handelt es sich bei der Nitrifikation um den wesentlich langsameren der beiden gleich-

zeitig ablaufenden Reinigungsprozesse, wodurch die vollständige Oxidation des Ammoniums ein verlässlicher Indikator für eine in diesem Sinn abgeschlossene Reinigung des Abwassers bildet.

Die Reaktionsgeschwindigkeit der Nitrifikation hängt grundsätzlich von der Konzentration der beteiligten Akteure Sauerstoff, Ammonium, Nitrifikanten sowie von der Temperatur ab. Dosiert man in einen belüfteten und mit Belebtschlamm gefüllten Kleinreaktor ohne Zu- und Abfluss (geregelt Sauerstoffkonzentration zwischen 2 und 3 mg O₂/l, «konstante» Nitrifikantenkonzentration und konstante Temperatur) eine gewisse Menge Ammonium, so lässt sich der in *Figur 2* dargestellte Verlauf der Sauerstoffzehrung und der Ammoniumkonzentration beobachten.

KLEINER SAUERSTOFFSPEICHER IM SYSTEM

Nach der Zugabe des Ammoniums stellt sich im Experiment ein Sauerstoffverbrauch von etwas über 1000 mg O₂/(l*d) ein. Dies bedeutet zunächst, dass der Speicher von Sauerstoff im System relativ klein ist, da 2 mg O₂/l bei Abschalten der Belüftung sehr schnell aufgebraucht wären. Aufgrund dieser kleinen Speicherwirkung kann die Sauerstoffkonzentration in einem grossen Becken sehr heterogen sein, was im Hinblick auf die Prozessregelung von hoher Relevanz sein kann.

ZEHRUNGSEINBRUCH ZEIGT REAKTIONABSCHLUSS

Bis das Ammonium zu einem grossen Teil abgebaut ist, bleibt die Zehrung (*Fig. 2*) relativ stabil. Dies zeigt, dass die Nitri-

fikationsgeschwindigkeit für diesen Bereich praktisch unabhängig von der Ammoniumkonzentration ist. Erreicht das Ammonium einen bestimmten Wert, beginnt die Zehrung stark abzusinken und stellt sich nach vollständigem Abbau des Ammoniums auf einem Niveau ein, das der endogenen Atmung des Schlammes entspricht (hier etwa 250 mg O₂/(l*d)).

SAUERSTOFFABHÄNGIGKEIT DER NITRIFIKATION

Während die Nitrifikationsgeschwindigkeit weitgehend unabhängig von der Ammoniumkonzentration ist, besteht eine starke Abhängigkeit von der vorhandenen Sauerstoffkonzentration. Diese Abhängigkeit der Geschwindigkeit kann anhand einer Modellvorstellung, der sogenannten *Monod-Kinetik*, abgebildet werden [6]. Dabei wird ein Sättigungsbeiwert der Konzentration geschätzt, bei der die Reaktion gerade mit 50% der maximal möglichen Geschwindigkeit abläuft. Befindet sich die massgebende Konzentration über dem Sättigungsbeiwert, läuft die Reaktion schneller ab, liegt sie unterhalb, langsamer.

Figur 3 zeigt die *Monod-Kinetik* der Nitrifikation in Bezug auf Sauerstoff. Die stärkere Linie ergibt sich für die gängige Annahme eines Sättigungsbeiwerts von 0,5 mg/l Sauerstoff [7]. Unter der Voraussetzung, dass Ammonium vorhanden ist, resultiert also bei 0,5 mg O₂/l eine Reaktionsgeschwindigkeit von 50% und bei 2 mg/l Sauerstoff eine Reaktionsgeschwindigkeit von 80%. Der transparent aufgetragene Bereich stellt eine Erweiterung des möglichen Bereichs des Sättigungsbeiwerts dar, wonach bei 2 mg/l Sauerstoff auch eine Reaktionsgeschwindigkeit von unter 70% vorliegen kann. Dies bedeutet gleichermassen auch, dass eine Erhöhung der Sauerstoffkonzentration auf über 2 mg O₂/l vergleichsweise mehr zusätzliche Reaktionsgeschwindigkeit liefert, wenn ein höherer Sättigungsbeiwert vorliegt.

EIN NICHTLINEARES SYSTEM

Anhand von *Figur 3* lässt sich eine weitere regelungstechnische Herausforderung ableiten. Die Antwort des geregelten Systems ist abhängig von dessen aktuellem Zustand und verhält sich stark nicht-linear. Um die Sauerstoffkonzentration zum Beispiel von 0,5 auf 1 mg O₂/l zu erhöhen, wird weit mehr zusätzliche Luft benötigt, als für eine Erhöhung von 2

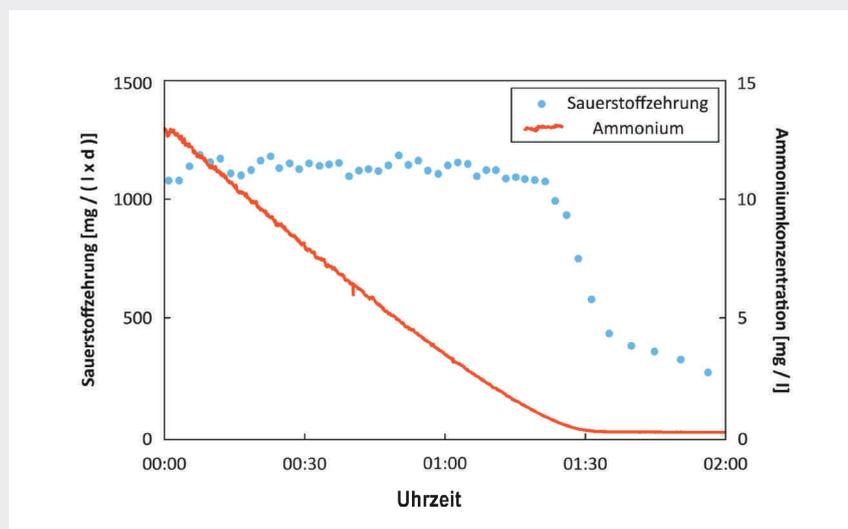


Fig. 2 Sauerstoffzehrung der Nitrifikation im Batchversuch
Consommation d'oxygène de la nitrification par essais sur lots

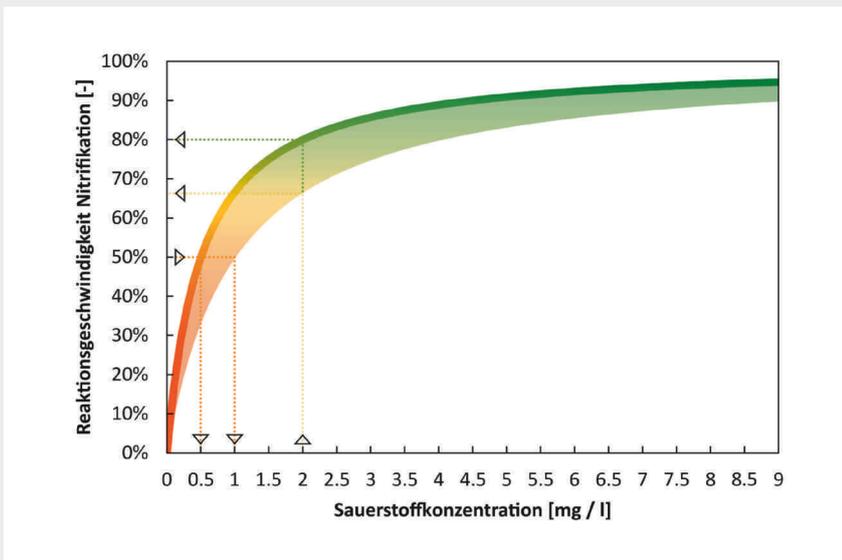


Fig. 3 Monod-Kinetik für die Nitrifikation bei einem Sättigungsbeiwert von 0,5 (starke Linie) bis 1 mg O₂/l (transparenter Bereich)

Cinétique de Monod pour la nitrification, saturation comprise entre 0,5 (ligne épaisse) et 1 mg O₂/l (zone transparente)

auf 2,5 mg O₂/l. Im ersten Fall muss der aufgrund der Konzentrationserhöhung zusätzlich gezehrte Sauerstoff ebenfalls transferiert werden, wohingegen bei 2 mg O₂/l bereits eine relativ hohe Zehrung vorliegt und ein zusätzlicher Sauerstoffeintrag daher mit vergleichsweise weniger Luft erreicht werden kann. Diese Überlegung muss zusätzlich mit Betrachtungen zum Sauerstofftransfer, der seinerseits ebenfalls abhängig von der Konzentration im Becken ist, erweitert werden. Die vorhandene Nichtlinearität des Systems führt dazu, dass mit linear konzipierten Regelungsparametern die Sauerstoffkonzentration bei hoher Belastung nur schwer erreicht werden kann, bei vorliegendem Abbau der Belastung die Konzentration den Sollwert jedoch schnell überschreiten kann.

AUSWIRKUNGEN AUF DIE REGELUNG – BEISPIELE

In *Figur 1* lässt sich bei mehreren ARA beobachten, dass der Sollwert in der vordersten Zone nicht erreicht werden kann. Dies liegt an der hohen Belastung im vorderen Teil der Biologie: Es ist mit den gegebenen Membrandichten oft nicht möglich, genug Luft einzublasen, um den Sollwert zu erreichen. Handkehrum deutet die Änderung im Sauerstoffsignal in diesem Fall auf den Belastungsverlauf der Anlage hin. Bei der ARA 1 scheint die Belastung morgens erwartungsgemäss geringer zu sein, daher steigt die Sauerstoffkonzentration in der ersten Zone an.

Dass der Sauerstoff in der zweiten Zone ebenfalls ansteigt und den Sollwert klar überschreitet, liegt daran, dass eine gewisse Mindest-Luftmenge eingeblasen werden muss, um die Durchmischung im Reaktor zu gewährleisten. Da die Belastung jedoch tief ist, wird der Sollwert schnell übertroffen. Hier kommt somit die unterschiedliche Sensitivität des Systems auf einen gewissen Luftvolumenstrom zum Tragen. Die Konzentration in Zone 2 sinkt erst kurz vor Mittag ab, was zeigt, dass die Belastungsspitze relativ spät in der Biologie eintrifft (ca. 11 Uhr). Dies liegt am angeschlossenen Netz und der mechanischen Reinigungsstufe der Anlage, die aufgrund ihrer Speicherwirkungen die Ankunft der Frachtspitze in der biologischen Stufe zeitlich verzögern. Diese Verzögerung ist hauptsächlich abhängig von der Länge des Kanalnetzes. So lässt sich ein ähnliches zeitliches Verhalten der Belastung wie im Fall der ARA 1 auch bei ARA 2 (höhere Sauerstoffkonzentration in Zonen 1 und 2 am Vormittag) beobachten.

Im Fall von ARA 3 und ARA 4 werden die Sollwerte dynamisch angepasst. Da die Sollwertanpassung auf das System abgestimmt ist, lässt sich hier indirekt die Belastung ablesen. Im Vergleich zu den anderen Anlagen weist die ARA 4 das kürzeste Netz auf, weshalb die Sollwerte schon um ca. 8.30 Uhr mit Ankunft der höheren Belastung hochgestellt werden müssen. Es fällt zudem auf, dass die erste Zone der Strasse B generell tiefere Sau-

erstoffkonzentrationen aufweist als die der Strasse A. Dies könnte auf eine ungleichmässige Verteilung der Last innerhalb der ARA oder auf unterschiedliche Beschaffenheit der Belüfter-Membranen in den verschiedenen Strassen hindeuten. Anhand der Signale können auch Aussagen über die Einstellungen der Regelparameter getroffen werden. Es zeigt sich, dass die Regelung der ARA 1 eher träge ist. Nach einer Störung, wie beispielsweise dem Spülprogramm am Nachmittag, dauert es vergleichsweise lange, bis die Konzentrationen in den Zonen 2 und 3 wieder eingeschwungen sind. Danach verhält sich der Konzentrationsverlauf stabil. Im Gegensatz dazu reagiert die Regelung der ARA 4 unabhängig von der Trockenwetterbelastung schnell auf eine Störung (Spülprogramme, Strasse A). In der Strasse B treten jedoch Schwingungen auf (Sauerstoffkonzentration und Schieber oszillieren gegenläufig), was auf eine für diese Betriebspunkte eher zu schnell eingestellte Regelung hindeutet.

REGELUNGS- UND ANLAGEN- TECHNISCHE KNACKPUNKTE

Zusätzlich zu jenen Herausforderungen, die systembedingt vorliegen, können noch weitere regelungstechnische Schwierigkeiten auftreten. Die Hauptursachen sind einerseits gekoppelte Regelkreise und andererseits Eigenschaften der anlagentechnischen Ausrüstung.

EINZELNE REGELKREISE KÖNNEN GEKOPPELT SEIN

Gekoppelte Regelkreise sind eine der Hauptproblematiken bei der Belüftungsregelung [5]. Solche liegen vor, wenn einzeln konzeptionierte Regelkreise, wie zum Beispiel die Sauerstoffregelung in verschiedenen Zonen, physikalisch gekoppelt sind. Dies zum Beispiel hydraulisch, wenn keine Trennwände zwischen den Zonen vorhanden sind, oder über eine gemeinsame Luftverteilung [5, 8]. Öffnet sich der Regelschieber zur einen Zone, wird wegen der Kopplung automatisch weniger Luft in die andere Zone eingetragen, was über die Sauerstoffregelung zu einer Öffnung des zweiten Schiebers und so wiederum zur Beeinflussung des Lufteintrags in die erste Zone führen wird. Für Probleme aufgrund von gekoppelten Regelkreisen sind regelungstechnische Lösungen vorhanden. Zum Beispiel wurde die Implementierung des sogenannten

Gleitdruckreglers bereits auf mehreren Schweizer Kläranlagen erfolgreich vorgenommen (unter anderem ARA 3 und 4). Das zugrunde liegende Prinzip ist die Kaskadierung der kommunizierenden Regelkreise, um diese möglichst zu entkoppeln [5]. Um hydraulische Kopplungen zu entschärfen, sind meistens bauliche Massnahmen notwendig.

AUSRÜSTUNG KANN DIE REGELUNG LIMITIEREN

Eine wesentliche Randbedingung der Regelung ist die Anlagenausrüstung. Gegebenermassen sind dort Einschränkungen vorhanden, die jedoch unterschiedliche regelungstechnische Auswirkungen mit sich bringen können. Gewisse Limitationen können zwar teilweise durch eine angepasste Regelungsstrategie umgangen werden, jedoch ist die bewusste Planung der Ausrüstung im Hinblick auf regelungstechnische Schwierigkeiten das einfachste Mittel, um solchen vorzubeugen.

Zum Beispiel kann die Anordnung der Belüfter-Elemente in den Becken regelungstechnisch eine grosse Rolle spielen, wenn die eingetragene Luft zu Walzenbildungen führt [8, 9]. Dies im Vorfeld abzuschätzen, ist nicht trivial. Weist jedoch die Gebläse-Staffel in dem von ihr bereitstellbaren Luftmengenbereich Lücken auf, sind keine Frequenz-Umrichter bei den Gebläsen oder keine regelbaren Schieber bei den Zonen vorhanden, wird dies zwangsläufig zu Schwankungen der Sauerstoffkonzentration führen, die durch die Regelung nicht austariert werden können. Regelungstechnische Überlegun-

gen sollten daher bereits Bestandteil der frühen Planung von Kläranlagen-Projekten sein.

BEISPIELE BEI DER ARA 2

Die ARA 2 weist einige der angesprochenen regelungstechnisch kritischen Punkte auf. Es muss vorausgeschickt werden, dass sich die Kläranlage bezüglich der Reinigungsleistung nicht problematisch verhält, jedoch ist die Prozessüberwachung schwierig und die Optimierungsmöglichkeiten sind sehr beschränkt. Der in *Figur 1* dargestellte Tagesverlauf der Sauerstoffkonzentration lässt sich in eine Phase niedriger Last am Vormittag und eine Phase mittlerer Last ab der Mittagszeit einteilen. In der ersten Tageshälfte überschiesst der Sauerstoff in der zweiten Zone den Sollwert, da die Belastung tief ist, jedoch aufgrund der vorhandenen minimalen Gebläseleistung nicht weniger Luft eingetragen werden kann. Da in der dritten Zone wesentlich weniger Belüftermembranen eingebaut sind als in Zone 2, und keine geregelten Schieber zwischen der gemeinsamen Luftleitung und den Belüfterelementen der einzelnen Zonen vorhanden sind, führt dies zu einer erheblich grösseren eingetragenen Luftmenge in Zone 2 als in Zone 3 und somit zu der beobachteten höheren Sauerstoffkonzentration. Geregelt wird die Anlage auf den Mittelwert der in den verschiedenen Strassen in Zone 2 gemessenen Sauerstoffwerte. Diese Strassen und Zonen sind alle über den gemeinsamen Kollektor gekoppelt, was in Kombination mit den nicht geregelten Schiebern zu den einzelnen Zonen

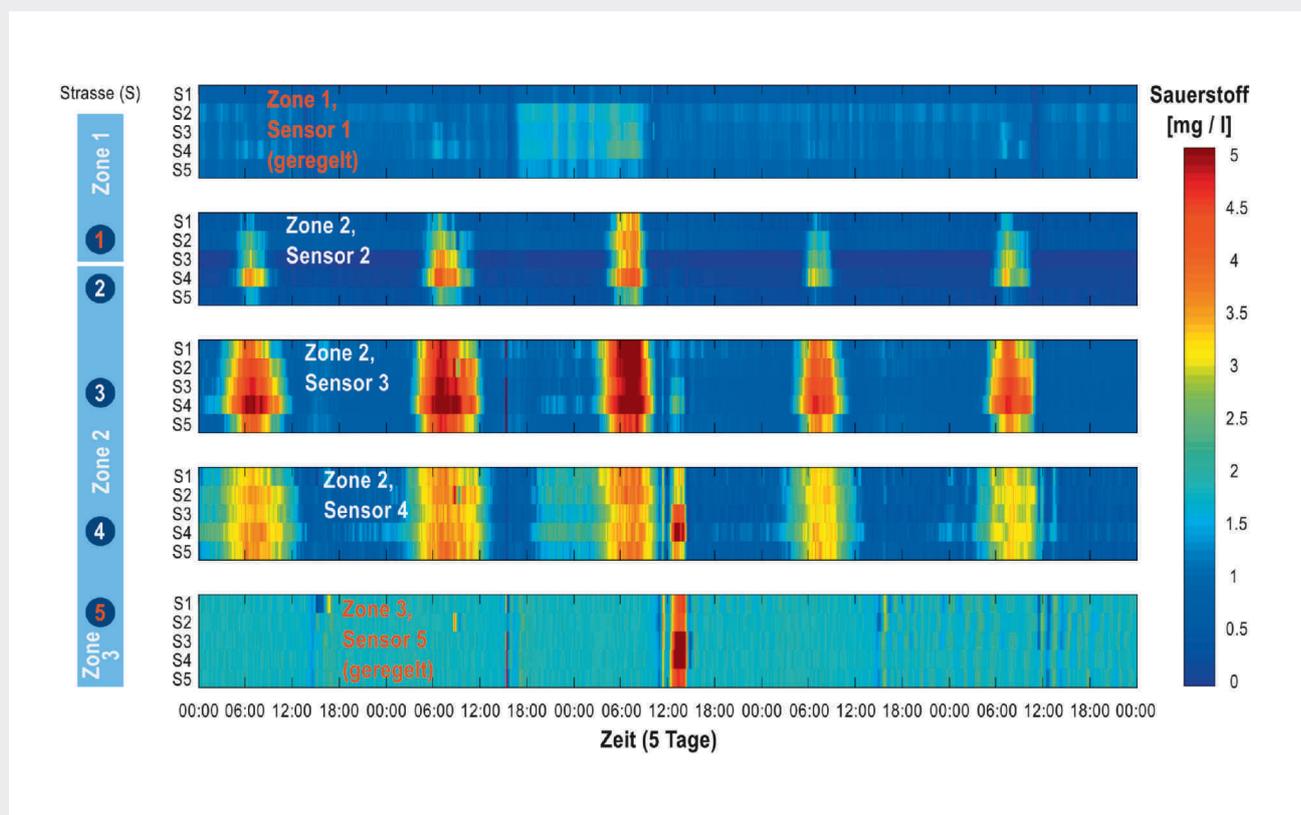


Fig. 4 Heterogene Sauerstoffkonzentrationen innerhalb eines Beckens bei Trockenwetter auf der ARA Schönau (1.-5. Dezember 2014). Die Darstellung zeigt die Sauerstoffkonzentrationen farblich für die fünf Sensoren (Rechtecke) und jeweils für alle fünf Strassen (Zeilen in den Rechtecken). Visualisiert wurden die Daten mit der Software SeNARA [1]

Concentration hétérogène en oxygène en bassin, temps sec, STEP de Schönau (1-5 décembre 2014).

La figure montre les concentrations en oxygène, en couleurs pour les cinq capteurs (rectangles) et pour chacune des cinq rues (lignes dans les rectangles). Les données ont été visualisées avec le logiciel SeNARA [1]

problematisch ist. Die Gebläse, die den Kollektor speisen, sind ebenfalls nicht regelbar, die Regelung besteht daher im Zu- und Abschalten der Gebläse, was zu Stufen in der bereitstellbaren Luftmenge führt. Die direkte Auswirkung lässt sich in der zweiten Tageshälfte beobachten. Einzelne Gebläse werden zu- und abgeschaltet, was zu den gemessenen starken Schwankungen führt.

INFORMATIONSGEWINN AUS PROZESSÜBERWACHUNG

Auch bei der ARA 3 lässt sich vormittags eine ungleichmässige Luftverteilung zwischen Zone 2 und 3 beobachten. Da sich die Regelung aber ansonsten robust verhält, bietet sich die ARA an, die Prozessüberwachung anhand von Sauerstoffmessungen zu vertiefen.

Aus diesem Grund wurden in der Biologie der ARA 3, bei der es sich um die ARA Schönau handelt, in allen fünf Strassen zusätzliche Sauerstoffsensoren installiert. Ergänzend zu den drei vorhandenen Sensoren wurden pro Strasse, wie auf der linken Seite in *Figur 4* dargestellt, zwei weitere Sensoren platziert. Somit weist jede der fünf Strassen fünf Sauerstoffsensoren auf. Geregelt wird jeweils Zone 1 auf die erste Sonde und Zone 2 und 3 zusammen auf die letzte Sonde (Sensor 1 und Sensor 5).

GROSSE HETEROGENITÄT IN DEN REAKTOREN

Figur 4 zeigt eine Datenreihe von fünf Tagen (1.–5. Dezember 2014). Die bereits in *Figur 1* beobachteten Schwankungen im Sauerstoffsignal sind auch hier zu finden (Überschuss in Zone 2 am Vormittag). Am stärksten treten die Schwankungen beim dritten Sensor auf, woraus folgt, dass an einem Tag, an derselben Position im Becken, Konzentrationen zwischen 0 und 5 mg O₂/l beobachtet werden. Wird ein grosses Becken, wie in diesem Fall Zone 2 und 3, die nicht durch eine Trennwand geteilt sind, mit nur einem Sensor geregelt, ist folglich mit einer grossen Heterogenität innerhalb des Beckens zu rechnen. Dies hängt einerseits mit einer nicht idealen Durchmischung, andererseits mit der Variabilität der Belastung und zusätzlich mit einer unter Umständen ungleichmässigen Belüftung zusammen. Handkehrum folgt, dass die Repräsentativität eines einzelnen Messwerts in einem Belebungsbecken stark limitiert ist. In Zusammenhang mit der kleinen Speichereigenschaft von



Fig. 5 Zustandsunterschiede von Belüftermembranen nach einer gewissen Zeit. Die Membranen wären gleichmässig im Becken verteilt, jedoch sind einzelne Membranteller verstopft und springen somit nur noch bei sehr hohem Luftdurchfluss an

Différences entre les membranes de ventilateurs après un certain temps. Les membranes sont réparties uniformément dans le bassin; les disques des membranes sont toutefois obstrués et ne se dégagent que si le débit d'air est très élevé

Sauerstoff im Belebtschlamm spielt diese Tatsache regelungs- und prozesstechnisch eine wichtige Rolle.

ZEITLICHE DYNAMIK DER BELASTUNG

Am Nachmittag und am Abend werden bis und mit Sensor 4 sehr tiefe Sauerstoffkonzentrationen gemessen. Dies bedeutet, dass bis zu dieser Position noch Ammonium im Abwasser vorhanden ist. Die Belastung ist zu dieser Zeit also, wie bereits erwähnt, erhöht im Vergleich zum Vormittag. Ein anderes Bild zeigt sich vormittags: Schon bei Sensor 2 deutet sich an, dass die Nitrifikation abgeschlossen ist, da die Sauerstoffkonzentration stark ansteigt. Erwartungsgemäss müsste die gemessene Konzentration jedoch derjenigen in Zone 3 entsprechen, da auch in Zone 3 die Nitrifikation abgeschlossen ist und die Zehrung in Zone 3 nicht höher sein kann als in Zone 2. Dennoch übersteigt die Konzentration in Zone 2 diejenige in Zone 3. Es folgt, dass das Phänomen durch die Belüfterplatten hervorgerufen werden muss und bei der Belüftung des langen Beckens mehr Luft in den vorderen Bereich (Zone 2) gelangt, als in den hinteren (Zone 3), wo die Regelung stattfindet. Solche Effekte bei den Belüfterelementen können zum Beispiel durch Ablagerungen hervorgerufen werden. Dass sich deren Verhalten über die Zeit verän-

dern kann, zeigt *Figur 5*, ein Beispiel der ARA Kloten Opfikon.

VERLAUF DER NITRIFIKATIONSKAPAZITÄT

In *Figur 6* ist eine entsprechende Grafik eines Regenwetterereignisses gezeigt, wobei es sich diesmal bei der Länge der Datenreihe um einen Tag handelt (24. August 2015). Der Regen trifft am Abend ein und verursacht einen Sauerstoffmangel in der gesamten belüfteten Biologie bis und mit der hintersten Zone, was einen Ammoniumdurchbruch zur Folge hat (*unten*). Dieser Effekt ist hydraulisch bedingt: Die ankommende Abflussspitze drückt das in der Anlage vorhandene Ammonium nach hinten, wodurch der Sauerstoff im hinteren Anlagenbereich gezehrt wird, ohne dass die Belüftung imstande wäre genügend Sauerstoff einzutragen, und dies trotz maximaler Gebläseleistung.

Aus den Sauerstoffdaten lässt sich, wie in *Figur 3* eingeführt, die Reaktionsgeschwindigkeit der Nitrifikation abhängig von der Sauerstoffkonzentration und dem Sättigungsbeiwert der *Monod*-Kinetik berechnen. Dies ist in *Figur 7* dargestellt, wobei ein Sättigungsbeiwert von 0,5 mg O₂/l angenommen wurde. Unter dieser Annahme resultiert, dass aufgrund des Regenereignisses die Nitrifikationsgeschwindigkeit im Mittel auf ungefähr 60% sank (20.00–23.00 Uhr). Hätte durch

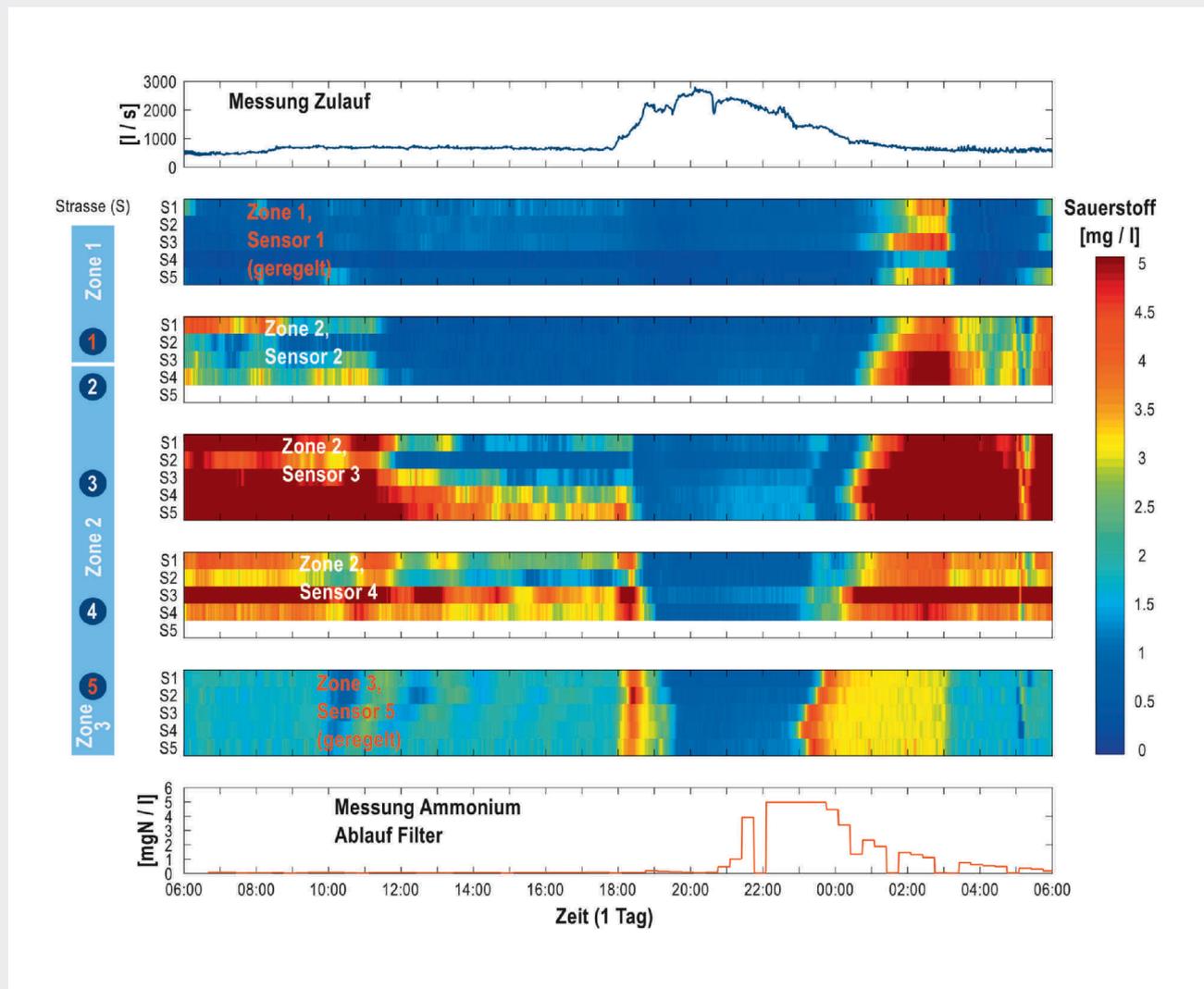


Fig. 6 Ammoniumdruchbruch bei einem Regenereignis (24. August 2015) auf der ARA Schönau. Die Messungen der Ammoniumkonzentration im Ablauf wurden mit einem Analyser erhoben

Percée d'ammonium en cas de pluie (24 août 2015) à la STEP de Schönau. Les mesures de concentration d'ammonium ont été réalisées au moyen d'un analyseur

die Belüftungseinrichtung genügend Sauerstoff eingetragen werden können, um den Sauerstoffsollwert von $2 \text{ mg O}_2/\text{l}$ zu erreichen, hätte die Geschwindigkeit jedoch 80% betragen. Weiter kann aufgrund von vorhandenen Ammonium-Messdaten, die mit ionenselektiven Ammoniumsonden im Zulauf der Biologie erhoben wurden, eine Frachtenberechnung vorgenommen wer-

den. Während der drei Stunden mit reduzierter Nitrifikationsgeschwindigkeit wurden ungefähr 700 kg Ammonium nitrifiziert. Wären in dieser Zeit 80% der maximalen Geschwindigkeit vorhanden gewesen, hätten über 900 kg Ammonium nitrifiziert werden können. Die Ammoniumfracht, die nach dem Filter gemessen wurde, betrug ungefähr 80 kg . Dies bedeutet, dass bei genügender Sauerstoffversorgung der Durchbruch problemlos hätte vermieden werden können. Zudem wäre es denkbar, die Sauerstoffkonzentration im Hochlastfall auf 3 bis $4 \text{ mg O}_2/\text{l}$ zu erhöhen, woraus im Vergleich zu den gemessenen Konzentrationen gegen 30% mehr Nitrifikationskapazität resultierten.

DANK

Die Autoren bedanken sich bei *Hanspeter Bauer* (Entsorgung St. Gallen), *Michael Kasper* (Abwasserreinigung Fischbach-Glatt, Abwasserreinigung Kloten Opfikon) und *Bernd Kobler* (Gewässerschutzverband der Region Zugersee-Küssnachtsee-Ägerisee) für die gute Zusammenarbeit und die Zurverfügungstellung von Betriebsdaten. Auch bedanken sich die Autoren beim VSA (Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute) für das Tragen des Projektes *DyRPA* (Dynamische Regelung und Prozessüberwachung in der Abwasserreinigung) sowie den Mitgliedern der Arbeitsgruppe «Regelungstechnik in der Abwasserreinigung» aus dem Projekt *DyRPA*.

SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK

Sauerstoff ist ein massgeblicher Parameter für die Nitrifikation. Von den drei Akteuren Ammonium, nitrifizierende Bakterien und Sauerstoff ist Sauerstoff derjenige Parameter, der sich für dynamische Anpassungen eignet. Ammonium stellt die Störgrösse des Systems dar und die Nitrifikanten werden über das Schlammalter geregelt. Dieses befindet sich auf einer wesentlich grösseren Zeitskala als die Regelung der Sauerstoffkon-

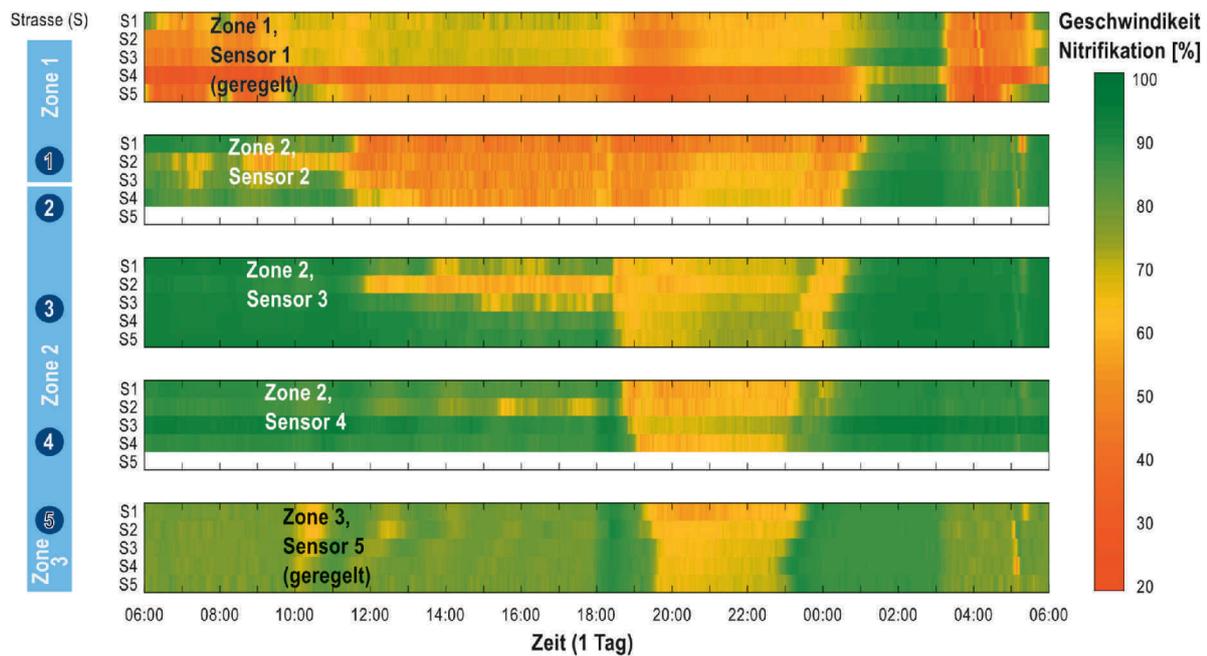


Fig. 7 Nitrifikationsgeschwindigkeit während einem Regenereignis (24. August 2015) auf der ARA Schönau, berechnet anhand der Monod-Kinetik unter der Annahme eines Sauerstoff-Sättigungsbeiwerts von $0,5 \text{ mg O}_2/\text{l}$

Vitesse de nitrification en cas de pluie (24 août 2015) à la STEP de Schönau, calculée au moyen de la cinétique de Monod, saturation d'oxygène estimée à $0,5 \text{ mg O}_2/\text{l}$

zentration, die sich aufgrund des kleinen Sauerstoffspeichers im System im Minutenbereich bewegt. Das nichtlineare Verhalten des Systems bietet Raum für die Entwicklung weiterer regelungstechnischer Ansätze, jedoch ist mit dem Gleitdruckregler bereits eine Lösung vorhanden, die eine robuste Belüftungsregelung ermöglicht.

Liegt eine robuste Belüftungsregelung vor, können aus den Sauerstoffdaten von ARA Informationen über den Belastungsverlauf der ARA, den Ablauf der Prozesse und über die Zustände in den Reaktoren sowie der Anlagenausrüstung gewonnen werden. Ausserdem können Abschätzungen bezüglich der Kapazität der ARA in Lastfällen angestellt werden. Somit kann Sauerstoff auch einen Tracer darstellen, was im Fall der ARA Schönau zum Einsatz zusätzlicher Sauerstoffsensoren zur Prozessüberwachung geführt hat. Neben Informationen über den Belastungsverlauf der ARA resultierten Erkenntnisse zum Zustand der Belüfterplatten sowie der Kapazität der Anlage in Lastfällen. Überhaupt liefert das Modell der Monod-Kinetik bezüglich Kapazitätsabschätzungen von nitrifizierenden ARA einen

Denkanstoss. Dieser kann Überlegungen aufgrund von Beckenvolumina sinnvoll ergänzen, schliesslich beeinflusst auch die Regelung die Kapazität einer Biologie und stellt somit ein wesentliches Feld für die Optimierung einer ARA dar.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] von Känel, L.; Braun, D. (2014): Prozessorientierte Datenvisualisierung, *AQUA & GAS N°12*, 38–45
- [2] Rieger, L. et al. (2006): Modelling of aeration systems at wastewater treatment plants, *Water Sci. Technol.* 53, no. 4, 439–447
- [3] Kampschreur, M. J. et al. (2009): Nitrous oxide emission during wastewater treatment, *Water Res.* 43 (2009), 4093–4103
- [4] Holzenthal, K. (2003): Gleitdruckregelung von Klärwerksverdichtern, *KA – Korrespondenz Abwasser Abfall Nr. 9*, 1157–1161
- [5] Braun, D. et al. (2012): Robuste und leistungsfähige Regelungskonzepte für Kläranlagen, *KA – Korrespondenz Abwasser Abfall Nr. 8*, 725–729
- [6] Henze, M. et al. (2000): *Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3*, IWA Publishing, London, England
- [7] Koch, G. et al. (2000): M. Kuhn, W. Gujer and H. Siegrist, Calibration and validation of activated sludge model no. 3 for swiss municipal wastewater, *Water Res.* 34, no. 14, 3580–3590

[8] Braun, D.; Gujer, W. (2008): Reactive tracers reveal hydraulic and control instabilities in full-scale activated sludge plant, *Water Sci. Technol.* 57, no. 7, 1001–1007

[9] Gresch, M. et al. (2011): Effects of aeration patterns on the flow field in wastewater aeration tanks, *Water Res.* 45 (2011), 810–818

> SUITE DU RÉSUMÉ

qui influe également sur hétérogénéité de la concentration en oxygène et est dû dans ce cas à l'état des conduits d'aération.

Les mesures réalisées en matière de concentration en oxygène ont aussi permis une évaluation continue de la capacité de nitrification de l'installation. En cas de pluie, par exemple, la STEP de Schönau perd environ 20% de sa capacité de nitrification, la concentration en oxygène dans le volume aéré global de la biologie baissant sensiblement en raison des précipitations. Si un apport suffisant en oxygène était assuré, les pénétrations d'ammonium constatées pourraient être évitées. Si, en situation de charge extrême, la concentration en oxygène était en outre augmentée à $3\text{--}4 \text{ mgO}_2/\text{l}$, la STEP de Schönau afficherait une capacité de nitrification jusqu'à 30% supérieure.