

# PROGNOSEBASIERTE STUFENLOS DYNAMISCHE SBR-STEUERUNG (ProDyn)

## MODELLBASIERTE ENTWICKLUNG EINER STEUERUNG/ REGLUNG FÜR DIE ARA OBERENGADIN

Die ARA Oberengadin ist momentan im Bau. Aufgrund des Tourismus und der alpinen Lage ist die Belastung der ARA im Jahresgang sehr variabel. Um die grosse Flexibilität des SBR-Verfahrens auszunutzen, wurde eine neuartige prognosebasierte dynamische SBR-Steuerung (ProDyn) entwickelt, die sich stufenlos den aktuellen Anforderungen anpasst. Eine definierte Rangfolge von Prioritäten sichert die zuverlässige Koordination der Reaktoren im Zielkonflikt zwischen hydraulischer Sicherheit und optimaler Reinigungsleistung.

Thomas Hug\*, Hunziker Betatech AG

Martin Wettstein, ETH Zürich und Hunziker Betatech AG

### RÉSUMÉ

#### GESTION SBR DYNAMIQUE EN CONTINU FONDÉE SUR DES PRÉVISIONS (PréDyn) – DÉVELOPPEMENT BASÉ SUR DES MODÈLES POUR LA STEP DE HAUTE-ENGADINE

La STEP de Haute-Engadine connaît une rénovation intégrale qui permettra de remplacer trois stations d'épuration. Pour des raisons liées au tourisme, la contamination a fluctué, au cours de l'année, entre 20 000 et plus de 100 000 EH. La purification biologique est effectuée, de par sa souplesse, via le procédé SBR. Alors que dans le procédé conventionnel avec des boues activées, plusieurs compartiments sont successivement traversés, le procédé SBR permet d'effectuer les phases de traitement dans un ordre chronologique à l'intérieur du même réacteur. Les installations SBR sont souvent exploitées avec une gestion intégrée du temps. Les étapes et leurs durées sont prédéfinies dans le système de commande des processus. En cas de pluie, le système permet de passer automatiquement à un cycle de temps de pluie prédéfini. Cette gestion fixe du temps ne permet cependant pas d'exploiter de manière optimale la grande flexibilité du procédé SBR. Ainsi, pour la STEP de Haute-Engadine, une nouvelle gestion SBR dynamique (PréDyn) basée sur des prévisions a été développée, laquelle s'adapte aux exigences (variations au cours de la journée/année, volumes d'eau précipités, types de fonctionnement et modifications des dépôts

### DAS SBR-VERFAHREN IST SEHR FLEXIBEL

#### PRINZIP

Das SBR-Verfahren (*Sequencing Batch Reactor*) ist eine Variante des Belebtschlamm-Verfahrens und wird auch Belebtschlammverfahren im Aufstaubetrieb genannt. Während im konventionellen Belebtschlammverfahren mehrere verschiedene Kompartimente nacheinander durchströmt werden (anaerobe, anoxische, aerobe Zonen sowie Nachklärbecken), finden beim SBR-Verfahren die einzelnen Behandlungsschritte (Phasen) in einer zeitlichen Abfolge (Zyklus) im gleichen Reaktor statt. Da ein einzelner Reaktor nur zeitweise beschickt wird, aber jederzeit Abwasser anfällt, benötigen SBR-Anlagen mehrere parallele Reaktoren (oder ein sehr grosses Vorlagevolumen). Die Dimensionierung basiert auf dem sogenannten Austausch- und Mindestvolumen. Das Erste hängt vom maximalen Zufluss ab, das Zweite von der Schlammproduktion, dem Schlammalter und den Absetzeigenschaften. Detaillierte Hinweise zur Auslegung finden sich z. B. im DWA-Merkblatt M 120 [1].

Das SBR-Verfahren ist sehr flexibel: Die Dauer und Intensität der einzelnen Behandlungsschritte ist im SBR ohne bauliche Massnahmen in einem weiten Bereich wählbar und kann den jeweiligen Abwasserbedingungen angepasst werden [2]. Der

\* Kontakt: [thomas.hug@hunziker-betatech.ch](mailto:thomas.hug@hunziker-betatech.ch)



Batchbetrieb, d.h. dass die Prozesse ungestört durch Zu- oder Abfluss im gleichen Behälter ablaufen, hat viele weitere Vorteile, insbesondere eine ungestörte Sedimentation sowie ein eindeutiger und messbarer Reaktionsverlauf von Nitrifikation und Denitrifikation. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit, die Dauer und Abfolge der einzelnen Phasen des Zyklus dynamisch aufgrund von Messgrössen zu steuern.

### ZEITSTEUERUNG

Oft werden SBR-Anlagen mit einer Zeitsteuerung betrieben. Dabei wird der Zyklus, d.h. die Abfolge und fixe Zeitdauer der einzelnen Phasen im Prozessleitsystem vorgegeben. Bei Regenwetter wird automatisch auf einen ebenfalls vordefinierten Regenwetterzyklus umgeschaltet. Dieser ist kürzer, damit mehr Wasser durch die Anlage geleitet werden kann. Dafür wird die Dauer für die Nitrifikation und Denitrifikation reduziert. Für verschiedene Belastungssituationen sind unterschiedliche Zykluseinteilungen angebracht: Trockenwetter, Regenwetter, Sommer, Winter, Hoch-/Tiefast, Sonderbetrieb mit weniger Reaktoren etc. Im Prozessleitsystem können verschiedene Zyklen definiert und gespeichert werden. Allerdings ist eine bestimmte Zyklusdefinition immer nur für eine ganz bestimmte Belastungssituation ideal. Die eingestellte Zeitsteuerung stellt also bereits im Verlauf eines Tagesgangs ei-

nen Kompromiss dar. Bei der Zykluseinteilung ist zwingend zu beachten, dass wenn ein SBR gefüllt ist, bereits der nächste sedimentiert und abgesenkt bereitstehen muss. Das Umschalten auf einen anderen Zyklus ist immer heikel, weil dann die Synchronisation der Reaktoren vorübergehend gestört wird. Bis die Zyklen aller Reaktoren wieder aufeinander abgestimmt sind, muss oft während einer gewissen Zeit das zufließende Abwasser zwischengespeichert werden.

Die fixe Zeitsteuerung hat den grossen Vorteil, dass für den Betreiber der Zustand der SBR-Anlage jederzeit transparent ist. Solange der Zyklus nicht verändert wird, ist der Zustand jedes SBR im Voraus bekannt. Der Nachteil ist, dass die grosse Flexibilität des SBR-Verfahrens nicht optimal ausgenutzt werden kann.

### DYNAMISCHE STEUERUNGEN

Dynamische Verfahren werden gleichzeitig gesteuert und geregelt. In diesem Artikel wird vereinfacht von «Steuerung» der SBR-Anlagen gesprochen.

Eine einfache und bereits recht effektive Dynamisierung kann im Rahmen der fixen Zeitsteuerung umgesetzt werden: Je nach Ammoniumfracht während der Befüllung eines SBR dauert es unterschiedlich lange, bis alles Ammonium nitrifiziert ist. Die Dauer der Belüftungsphase ist aber fix eingestellt (Fig. 1). Nach Abschluss der Nitrifikation könnte die

Belüftung abgeschaltet werden. Dadurch würde Energie gespart und die Stickstoffelimination erhöht.

Die Herausforderung besteht darin, das Ende der Nitrifikation zu erkennen. Ionenselektive Ammoniumsonden sind im notwendigen tiefen Konzentrationsbereich ungenau und wartungsintensiv. Da die Konzentration langsam abnimmt, wäre ein diskontinuierlich messender Analyzer eine Alternative. Weil die Reaktion im Batch stattfindet, kann die Nitrifikation aber auch durch die rasche Abnahme der Sauerstoffzehrung erkannt werden. Als Messgrösse dient die Kombination von der Gebläsedrehzahl und der Sauerstoffkonzentration.

Eine weitergehende Dynamisierung des SBR-Zyklus beinhaltet die Veränderung der Dauer der Zyklen je nach Belastung. In der ARA Birs BL (150 000 EW) wird die SBR-Anlage seit einigen Jahren dynamisch gesteuert [3]. Das Steuerungskonzept wurde durch den Betreiber (AIB) und die *Chestonag Automation AG* entwickelt. Es basiert auf dem Grundsatz, dass ein Zyklus nur so lange dauern soll wie nötig, damit der SBR so rasch als möglich wieder für den nächsten Zyklus bereitsteht. Die Dauer des Gesamtzyklus wird aus der jeweiligen Befüllzeit berechnet. Dank dieser Steuerung konnte das Vorlagevolumen und die Gebläselaufzeit reduziert werden. Die einzelnen SBR funktionieren grundsätzlich selbständig.

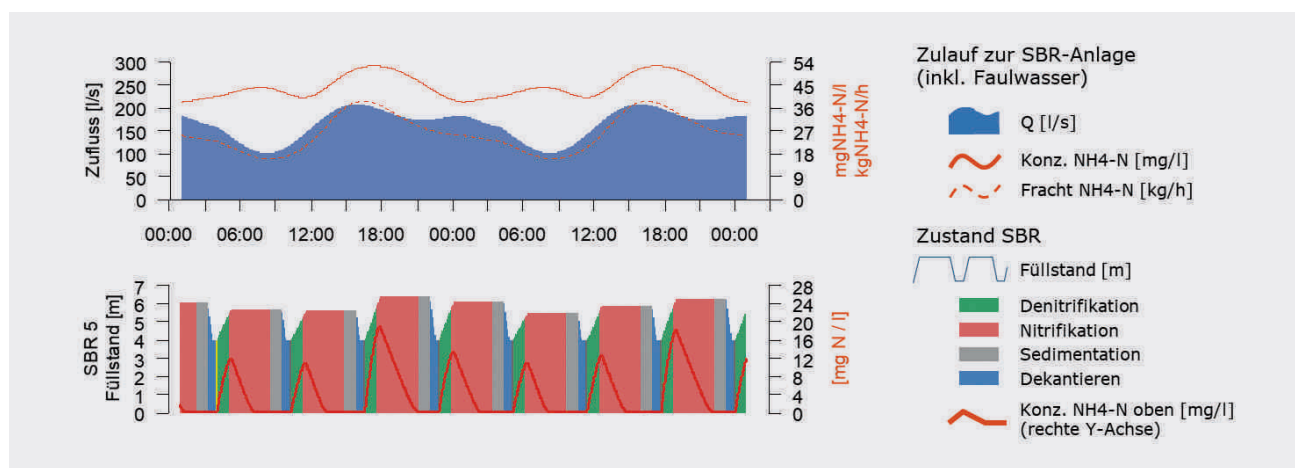


Fig. 1 Zyklus eines SBR-Reaktors mit einer Zeitsteuerung (Simulationsresultate). Die Zeitsteuerung ist so eingestellt, dass zu Beginn der Füll-Phase zuerst nur gerührt wird (grüne Fläche). Anschliessend wird eine fixe Zeit belüftet (rote Fläche). Die rote Kurve zeigt den Verlauf der Ammonium-Konzentration. Wenn der SBR während der Nachmittagsspitze befüllt wird, wird die ganze Belüftungszeit benötigt, um alles Ammonium zu nitrifizieren. Zu den anderen Zeiten ist die Nitrifikation bereits nach rund der Hälfte der Belüftungszeit beendet.

Cycle d'un réacteur SBR doté d'un système de gestion du temps (résultats de simulations). Le système de gestion du temps est réglé de telle sorte qu'au début de la phase de remplissage les eaux ne sont que brassées (surface verte). Ensuite, le mélange est aéré pendant une durée fixe (surface rouge). La courbe rouge montre l'évolution de la concentration d'ammonium. Si le système SBR est rempli durant le pic de l'après-midi, toute la durée d'aération est nécessaire pour nitrifier tout l'ammonium. En dehors de ce pic, la nitrification est achevée dès la moitié de la durée d'aération.

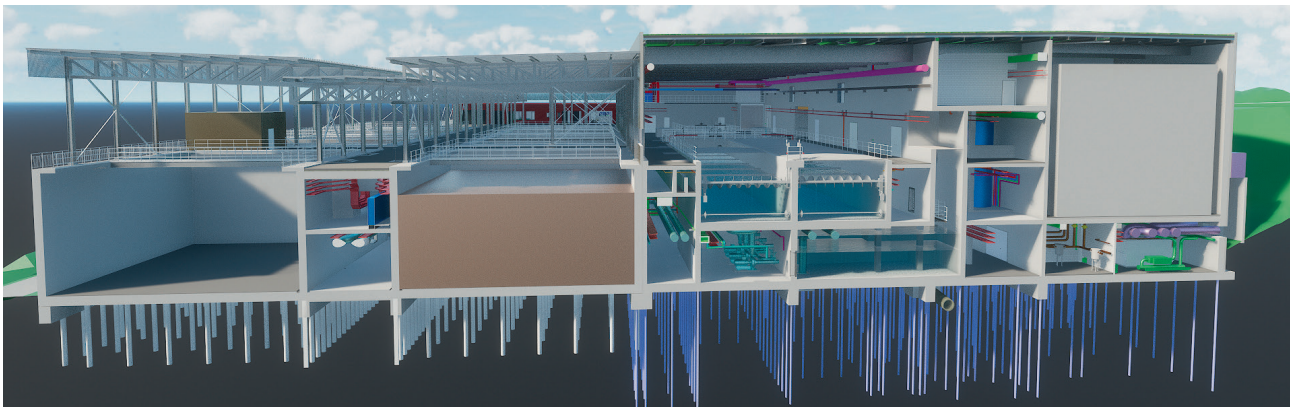


Fig. 2 Querschnitt durch die projektierte ARA Oberengadin (BIM Gebäudemodell): links die SBR-Anlage, rechts eingehaust die mechanische Reinigung, die Schlammbehandlung und das Auslaufpumpwerk.

Section transversale de la STEP planifiée de Haute-Engadine (modèle de bâtiment BIM): à gauche, l'installation SBR; à droite, le nettoyage mécanique, le traitement des boues et la pompe d'évacuation.

Die Reihenfolge der Teilprozesse ist vorgegeben. Das Ende der vorgeschalteten Denitrifikation wird durch das Redox-Signal (Redox-Knie) erkannt, das Ende der danach folgenden Nitrifikation durch die Abnahme der Sauerstoffzehrung. Die Sedimentation ist zeitgesteuert. Nach dem Dekantieren wartet der SBR in der Warteposition auf das Signal zur nächsten Befüllung. Es wird zwischen den Lastfällen Trocken- und Regenwetter unterschieden. Beim Umschalten wird das Absenkniveau angepasst und allenfalls bei den SBR im Wartezustand nachdekantiert, damit sie mehr Wasser aufnehmen können. Die Dauer der Nitrifikation wird nicht prognostiziert. Wenn aufgrund der Koordination der Reaktoren die Sedimentation gestartet werden muss, bevor die Nitrifikation abgeschlossen ist, kann die übergeordnete Steuerung bei ausreichender Gesamtkapazität den betroffenen SBR vorübergehend aus der Koordination herauslösen, damit er ausreichend Zeit für die Nitrifikation hat.

Die in diesem Artikel beschriebene *Pro-Dyn-SBR-Steuerung* geht noch weiter: Die Zyklusdauer wird prognostiziert und die Anpassung an die momentanen Anforderungen erfolgt stufenlos.

Eine umfangreiche Zusammenstellung von Grundlagen und Empfehlungen zur dynamischen Regelung von Kläranlagen mit verschiedenen Verfahren werden aktuell im VSA-Projekt *Dynamische Regelung und Prozessüberwachung in der Abwasserreinigung (DyRPA)* erarbeitet [4]. In der Projektgruppe sind Verfahrensingenieure, Elektroplaner, Automatisierer und die Forschung vertreten. Der Schlussbericht soll 2018 als Leitfaden publiziert werden.

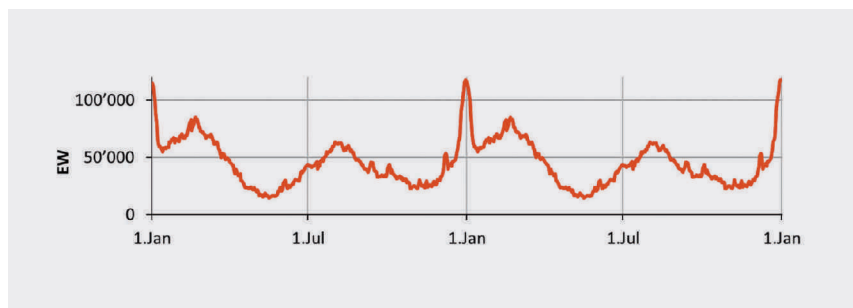


Fig. 3 Schmutzstoffbelastung der ARA Oberengadin im Jahresverlauf (Mittelwerte aus Betriebsdaten 2006–2015)

Evolution au cours de l'année de la concentration de polluants dans la STEP de Haute-Engadine (valeurs moyennes provenant des données opérationnelles 2006–2015)

## ARA OBERENGADIN

Im Oberengadin werden drei bestehende Kläranlagen stillgelegt. Das Abwasser wird künftig in einer neuen regionalen ARA in S-chanf GR gereinigt. Die ARA Oberengadin ist seit 2017 im Bau und wird 2021 in Betrieb gehen.<sup>1</sup> *Figur 2* zeigt einen Schnitt durch die sehr kompakte Anlage [5].

Wegen des Tourismus variiert die Belastung der ARA im Jahresverlauf sehr stark (*Fig. 3*). In der Nebensaison leben rund 20 000 Einwohner im Tal, an Weihnachten steigt die Belastung innert kurzer Zeit auf über 100 000 EW an. Während der Winterhochsaison sind es heute rund 80 000 EW, in der Sommersaison bis 60 000 EW. Durch Tages- und Wochenend-Touristen kann die Belastung von Tag zu Tag stark schwanken. Die Wassermenge variiert ebenfalls stark, es gibt keine einheitliche «Trockenwettermenge» wie in vielen anderen Einzugsgebieten. Während der Schneeschmelze im April/Mai

fließt viel stark verdünntes und kaltes Abwasser auf die ARA. Weil der Boden im Winter gefroren ist, gibt es während der Spitzenzeit kaum Fremdwasser und das Abwasser ist selten kälter als 10 °C. Aufgrund des sehr weichen Trinkwassers enthält das Abwasser nur wenig Säurebindungsvermögen.

Die Einleitungsbedingungen sind moderat, da das gereinigte Abwasser nicht in den Inn, sondern in einen Kraftwerkskanal eingeleitet wird. Verlangt wird eine ganzjährige Nitrifikation, aber keine Stickstoffelimination. Wegen des geringen Säurebindungsvermögens des Abwassers wird trotzdem eine maximale Denitrifikation angestrebt. Mikroverunreinigungen müssen nicht eliminiert werden. Die Anforderungen an GUS und Phosphor verlangen keine Filtration. Während der Nebensaison darf die maximal zu reinigende Wassermenge reduziert werden.

In einer detaillierten Vorstudie wurde 2014 beschlossen, dass die biologische Reinigung mit dem SBR-Verfahren erfolgen soll. Ein wichtiger Entscheidungs-

<sup>1</sup> s. ARA Porträt ARA Oberengadin, S. 5

grund war die Flexibilität, um mit den genannten Anforderungen umzugehen. Die SBR-Anlage wurde statisch auf die mittlere Belastung im Februar ausgelegt (75 000 EW, maximal 405 l/s). Im Erstausbau werden fünf Reaktoren mit je 2700 m<sup>3</sup> gebaut. Ein sechster Reaktor wird im Rohbau erstellt, aber nicht ausgerüstet. Während der Tiefastzeit wird allenfalls ein Reaktor ausser Betrieb genommen. Die Extrembelastung am Jahresende wird durch eine geschickte Betriebsführung bewältigt. Der Nachweis wurde mittels dynamischer Simulation erbracht. Im Laufe der Planung wurde deutlich, dass eine dynamische Steuerung der SBR-Anlage erhebliche Vorteile bringt.

## ProDyn-SBR FÜR DIE NEUE ARA

### ZIELE

Die ARA Oberengadin wird von Grund auf neu gebaut. Sie soll als zukunftsweisende Anlage unter speziellen Anforderungen ein Zeichen bezüglich Technologie, Energieeffizienz, Kompaktheit, Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit setzen. Aus folgenden Gründen wurde eine neuartige dynamische Steuerung für die SBR-Anlage entwickelt:

- Das SBR-Verfahren wurde wegen der grossen Flexibilität gewählt. Diese kann nur mit einer dynamischen Steuerung optimal ausgenutzt werden.
- Durch die ausgeprägte jahreszeitliche Variabilität des Trockenwetterzuflusses zur ARA Oberengadin müssten die Einstellungen einer Zeitsteuerung zeitweise alle paar Tage angepasst werden. Die dynamische Steuerung soll sich automatisch und stufenlos den Anforderungen anpassen (Zuflussmenge, Schmutzstofffracht, Temperatur, Absetzeigenschaften).
- Die Gebläse sollen nicht länger als nötig laufen. Der CSB im Abwasser soll möglichst anoxisch in der Denitrifikation abgebaut werden.
- Wegen des geringen Säurebindungsvermögens des Abwassers würde die Nitrifikation durch die eigene Säurebildung zeitweise gehemmt. Ein Teil der Säure wird durch die Denitrifikation wieder verbraucht. Deshalb soll die dynamische Steuerung die Denitrifikation möglichst jederzeit optimieren. Dadurch muss weniger Kreide als Puffer dosiert werden.
- In der Nebensaison kann ein Reaktor ausser Betrieb genommen werden. Die

neuartige Steuerung unterstützt diese Umstellung durch eine automatische Anpassung des Zyklus.

- Das Abwasser durchfließt die ARA im freien Gefälle und wird am Schluss in den Auslaufkanal hochgepumpt. Um ein zweites Pumpwerk zu vermeiden, wurde auf einen Vorlagebehälter für die SBR-Anlage verzichtet. Dies erhöht die Anforderungen an die Steuerung.

### DYNAMISCHES MODELL

Bereits in frühen Planungsphasen wurde mit der Software *Simba#* [6] ein dynamisches Simulationsmodell der SBR-Anlage erstellt, um die Dynamik der saisonalen Übergänge in der Auslegung zu berücksichtigen. Dieses Modell war ein unverzichtbares Instrument für die Entwicklung der *ProDyn*-Steuerung und kann später für die Betriebsunterstützung eingesetzt werden.

### PRINZIP

Als Grundidee soll jede Phase des Zyklus nur so lange dauern wie nötig oder sinnvoll. Jeder Reaktor soll autonom seinen Zyklus optimieren. Eine übergeordnete Master-Steuerung sorgt für die Koordination der einzelnen Reaktoren. Dabei stellen sich folgende Herausforderungen:

- Die Prozesse innerhalb eines Zyklus laufen grundsätzlich in folgender Reihenfolge ab: Denitrifikation - Nitrifikation - Sedimentation - Dekantieren.
- Die Flexibilitäten sind aber genau umgekehrt: Sedimentation und Dekantieren kommen am Schluss, müssen aber zwingend ablaufen und können nicht beschleunigt werden. Die Nitrifikation soll möglichst vollständig ablaufen. Die Denitrifikation soll so weit erfolgen, wie Zeit verbleibt. Für eine optimale vorgeschaltete Denitrifikation muss also bereits zu Beginn des Zyklus bekannt sein, wie lange die darauffolgenden Prozesse der Nitrifikation, Sedimentation und Dekantieren dauern.

Daher muss der dynamische Zyklus aufgrund von Prognosen über die erwartete Dauer der einzelnen Phasen gesteuert werden.

Die Steuerung soll sich zudem stufenlos an die entsprechenden Bedingungen anpassen, statt zwischen einzelnen vordefinierten Zyklen hin- und herzuschalten. Dazu braucht sie Regeln, wie sie mit dem Zielkonflikt zwischen hydraulischer Kapazität und Reinigungsleistung umgehen soll. Deshalb wurden, angelehnt an das *DyRPA*-Konzept [4], eine Prioritäten-Rangfolge gemäss *Tabelle 1* definiert. Die *ProDyn*-Steuerung beachtet diese Prioritäten konsequent. Dies bedeutet, dass die Steuerung bei einem starken Anstieg der Zuflussmenge nicht nur die Denitrifikation, sondern allenfalls auch die Nitrifikation in einem SBR frühzeitig abbrechen darf und muss, damit er rechtzeitig sedimentiert und dekantiert bereitsteht, wenn der vorangehende SBR vollständig befüllt ist.

### Prognosebasierte Steuerung

Die *ProDyn*-Steuerung ist prognosebasiert auf zwei Stufen:

- Prognose der maximalen «kritischen» Zyklusdauer
- Prognose der einzelnen Phasen für jeden SBR

Das Prinzip der übergeordneten Prognose für die maximale Zyklusdauer ist in *Figur 4* schematisch dargestellt:

- (a) Zu Beginn eines Zyklus wird die sogenannte kritische Zyklusdauer berechnet, unter der Annahme, dass der Zufluss gerade dem kritischen, d.h. maximal erwarteten Zufluss entspricht. Aus der bekannten Dauer für Sedimentieren und Dekantieren wird die verfügbare Dauer für die biochemischen Reaktionen (Nitrifikation, Denitrifikation, Bio-P) berechnet.
- (b) Der effektive Zufluss ist immer kleiner als der kritische Zufluss. Daher

Priorität	Prozess/Ziel	Bemerkung
1	kein Belebtschlamm im Ablauf	Gewässerverschmutzung und lang anhaltender Verlust der Reinigungsleistung
2	alles Abwasser in die SBR	besser eine unvollständige biologische Reinigung als gar keine
3	vollständige Nitrifikation	
4	maximale Denitrifikation	implizit auch Minimierung Energie- und Chemikalienverbrauch

Tab. 1 Prioritäten für die *ProDyn*-SBR-Steuerung  
Priorités pour la gestion *PréDyn*-SBR



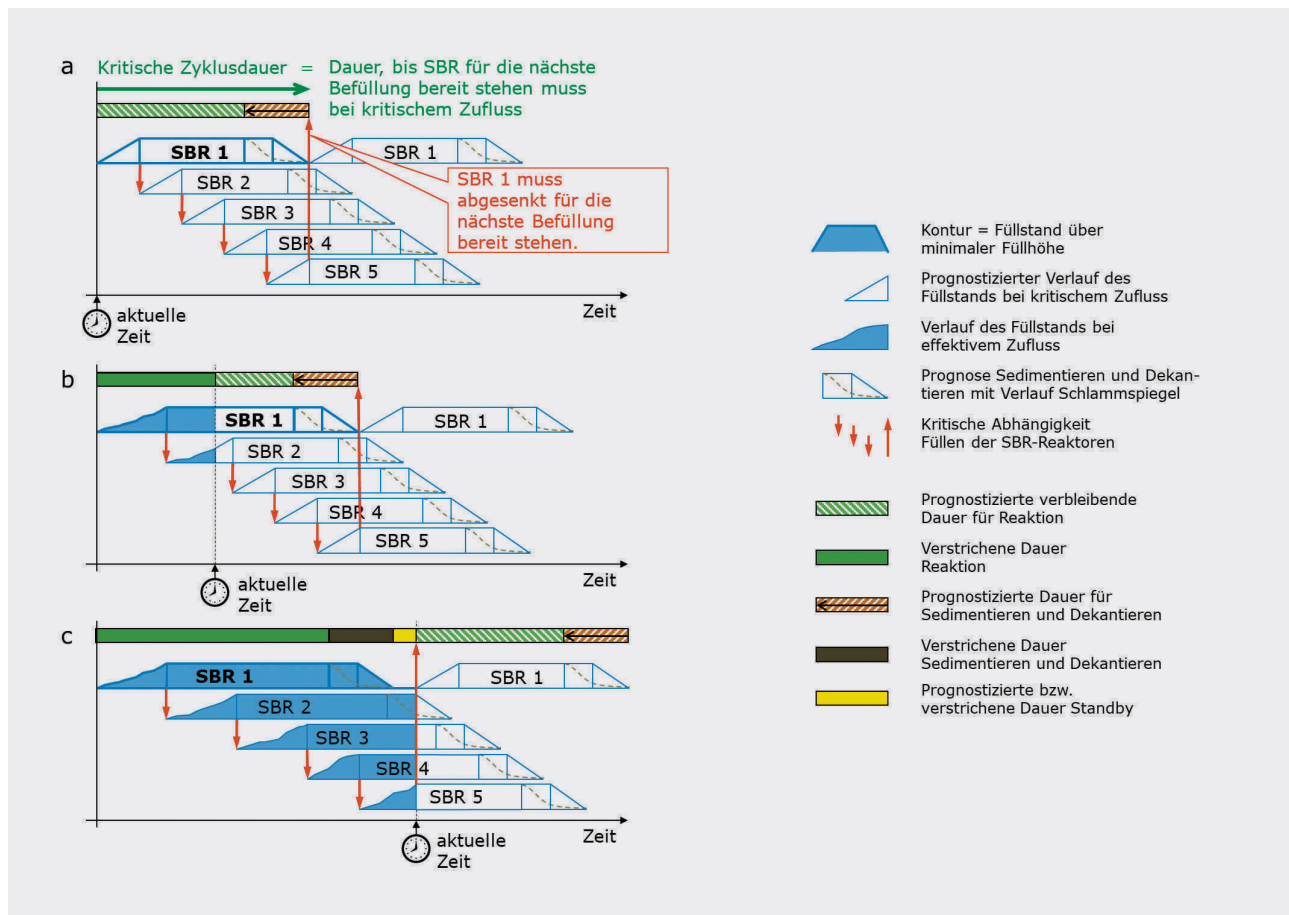


Fig. 4 Prinzip der prognosebasierten ProDyn-Steuerung

Principe de la gestion PréDyn basée sur des prévisions

verlängert sich die insgesamt Reaktionsdauer laufend. Die minimal verfügbare Dauer wird laufend neu berechnet.

- (c) Da der Zufluss auch während des Sedimentierens und Dekantierens grösser ist als der kritische Zufluss, bleibt nach Abschluss von Sedimentieren und Dekantieren eine Restzeit, bis der Reaktor wieder befüllt wird.

5. Nachbelüften (zur Sicherheit und zum Abbau von akkumuliertem Nitrit).
6. Sedimentation, bis der Schlamm Spiegel ausreichend tief ist.
7. Dekantieren (Klarwasserabzug), bis das vorgewählte Minimalvolumen erreicht ist.
8. Standby (warten bis zum nächsten Befüllen).

Die Phasen 2–5 sowie 8 können jederzeit durch die übergeordnete Master-Steuerung abgebrochen werden.

Das Ende der Nitrifikation wird in der ARA Oberengadin aus dem Zusammenhang zwischen Sauerstoffkonzentration und Gebläsedrehzahl ermittelt.

Der Abzug des Überschussschlammes (ÜSS) kann grundsätzlich jederzeit erfolgen. Die zu entnehmende Menge wird berechnet aus dem angestrebten aeroben Schlammalter sowie der gewählten minimalen und maximalen TS-Konzentration. Diese Werte können für jeden SBR unterschiedlich gewählt werden.

Faulwasser wird in den Zulaufkanal zur SBR-Anlage dosiert. Wichtig ist, dass die Einleitstelle vor der Ammonium-Messung

liegt, da sonst die Dauer der Nitrifikation falsch prognostiziert wird.

Wird ein SBR geplant ausser Betrieb genommen, müssen keine Einstellungen angepasst werden. Die Steuerung passt die Zyklen der anderen Reaktoren automatisch so an, dass sie die erhöhte Wassermenge aufnehmen können. Erst wenn so ausreichend Kapazität geschaffen worden ist, wird der SBR während des Standbyzustands aus der Befüll-Reihenfolge herausgenommen. Bei der Wiederinbetriebnahme wird der SBR in die Reihenfolge aufgenommen, und die Zyklen aller SBR passen sich automatisch an. Auch wenn ein SBR durch einen Störfall plötzlich und unvorhergesehen ausfällt, passt die prognosebasierte Steuerung die Zyklen der verbleibenden Reaktoren automatisch an. In diesem ungeplanten Fall kann kurzzeitig zufließendes Abwasser entlastet werden.

Im Interesse der Transparenz für den Betreiber wurde auf komplexe weitere Mechanismen in der Steuerung bewusst verzichtet, wie z.B. Mehrfachbeschickung zur Optimierung der Denitrifikation, Nachdekantieren zur raschen

Die Prognosen für die Dauer der einzelnen Phasen stammen nicht aus unsicheren komplexen Modellen, sondern werden direkt aus dem vorangegangenen Zyklus des entsprechenden SBR abgeleitet.

Der dynamische Zyklus eines einzelnen SBR läuft innerhalb der prognostizierten Zyklusdauer idealisiert folgendermassen ab:

1. Füllen, bis der SBR voll ist.
2. Vorgeschaltete Denitrifikation, bis kein Nitrat mehr vorhanden ist.
3. Nitrifikation, bis kein Ammonium mehr vorhanden ist.
4. Nachgeschaltete Denitrifikation so lange als zulässig oder bis kein Nitrat mehr vorhanden ist.

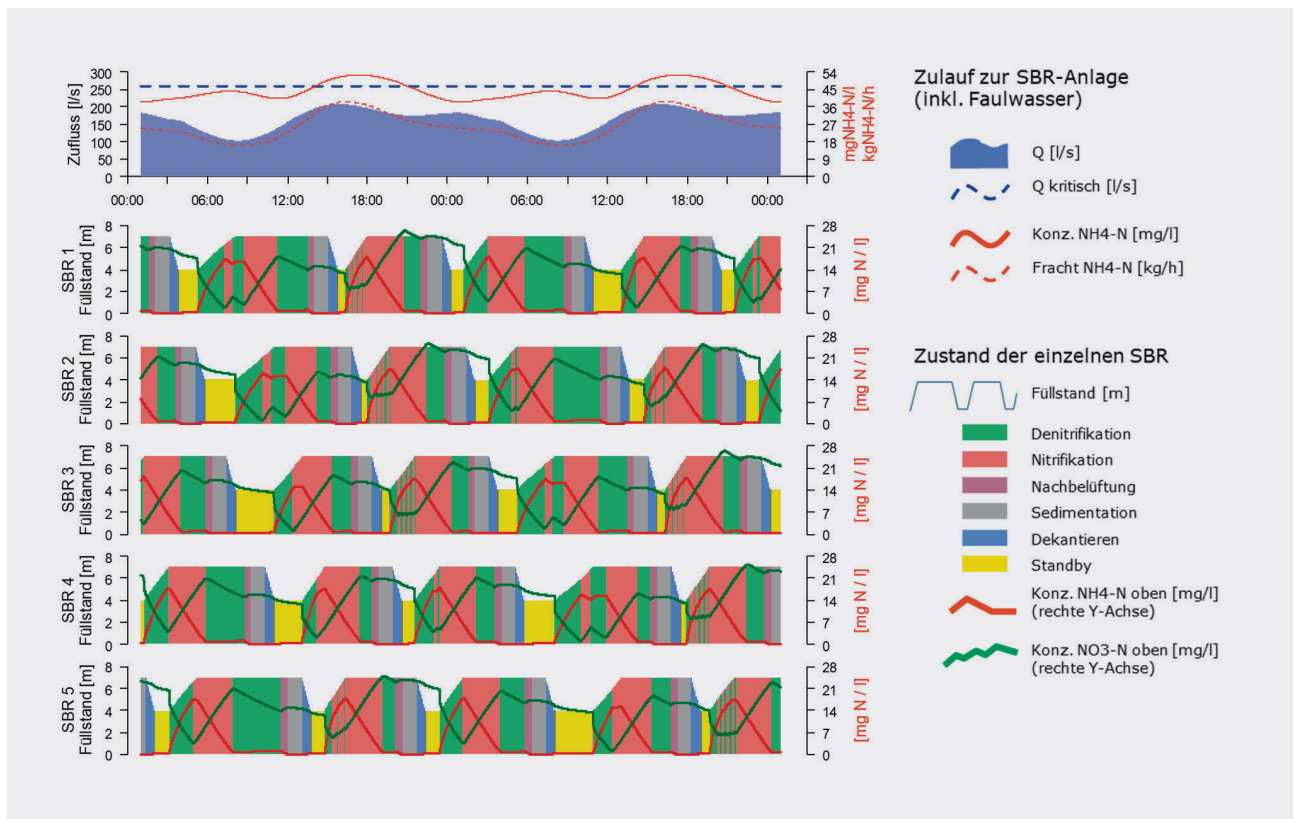


Fig. 5 Dynamisches Verhalten der fünf SBR-Reaktoren der ARA Oberengadin während drei Tagen in der Winterhochsaison (Simulationsresultate). Oben: Tagesgang des Zulaufs (Zuflussmenge und Ammonium). Die Visualisierung der einzelnen SBR zeigen den Wasserstand (Höhe) und mit den Farben die einzelnen Phasen. Die Kurven zeigen den simulierten Verlauf der Ammonium- (rot) und Nitratkonzentration (grün).  
 Comportement dynamique des réacteurs SBR de la STEP de Haute-Engadine 3 jours pendant la haute saison hivernale (selon des simulations). En haut, évolution de l’affluent au cours de la journée (volume d’afflux et ammonium). La visualisation des SBR montre le niveau de l’eau; les couleurs correspondent aux phases. Les courbes présentent l’évolution des concentrations d’ammonium (rouge) et de nitrate (vert).

Erhöhung der hydraulischen Kapazität oder Limitierung der Ammoniumfracht in einen Reaktor zur Begrenzung der Zyklusdauer.

**DYNAMISCHES VERHALTEN DER SBR-ANLAGE**

Figur 5 zeigt das dynamische Verhalten der fünf SBR-Reaktoren der ARA Oberengadin als Resultat der dynamischen Simulation. Dargestellt sind drei Trockenwettertage mit hoher Belastung in der Winterhochsaison. Der kritische Zufluss ist konstant eingestellt (gestrichelte blaue Linie). Es ist deutlich sichtbar, dass die Zyklen unterschiedlich lang sind und die Verteilung von belüfteter (rot) und unbelüfteter (grün) Phase unterschiedlich verteilt ist.

Figur 6 zeigt einen vergrößerten Ausschnitt: Während des ersten Zyklus ist der Zufluss und die Ammoniumfracht geringer als beim zweiten. Dadurch dauert der Zyklus länger; die Nitrifikation jedoch ist insgesamt kürzer. Die Steuerung gewährt dem SBR eine vorgeschaltete Denitrifikation (grün) so lange, bis die Nitrifikation (rot) beginnen muss, damit sie unter der

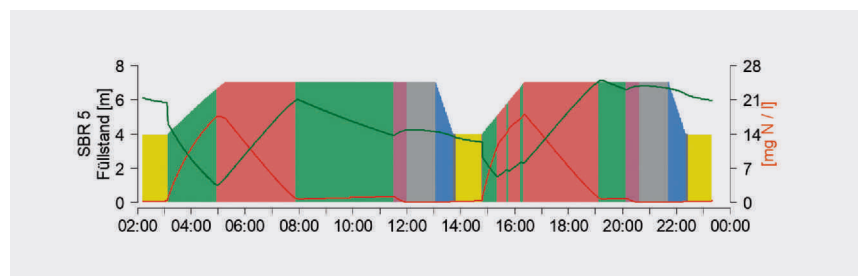


Fig. 6 Typische Zyklen bei Trockenwetter (Simulationsresultate). Die Befüllung im ersten Zyklus erfolgt bei Niedriglast, beim zweiten während der Tagesspitze (s. auch Fig. 5).  
 Cycles typiques par temps sec (résultats de simulations). Le remplissage lors du 1er cycle est effectué en situation d’étéage, le 2e cycle a lieu durant le pic de la journée (cf. Fig. 5).

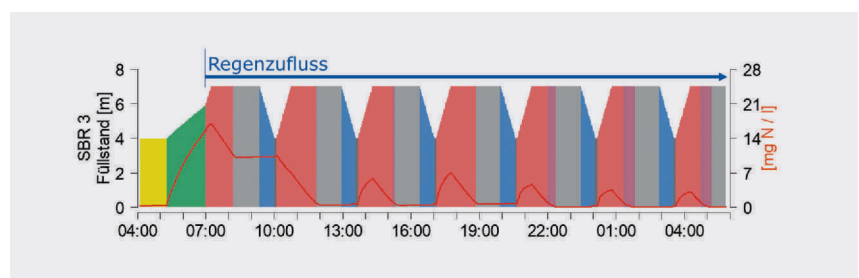


Fig. 7 Automatische Anpassung des Zyklus bei Einsetzen eines Starkniederschlags (Simulationsresultate) (s. auch Fig. 5).  
 Adaptation du cycle lors de fortes précipitations (résultats de simulations) (cf. aussi Fig. 5).

Worst-case-Annahme des kritischen Zuflusses noch vollständig ablaufen kann. Da der effektive Zufluss zur Anlage jedoch geringer bleibt, ist nach Abschluss der Nitrifikation noch grosszügig Zeit für eine nachgeschaltete Denitrifikationsphase (*grün*) vorhanden. Beim nächsten Befüllen erhält der SBR-Zufluss während der Tagesspitze. Die gesamte Zyklusdauer ist nun kürzer, da der effektive Zufluss näher beim kritischen Zufluss liegt. Die totale Nitrifikationsdauer ist hingegen aufgrund der höheren Ammoniumfracht länger. Auch in diesem Zyklus besteht zu Beginn kurz Zeit für Denitrifikation, bevor die Steuerung sicherheitshalber die Belüftung einschaltet. Da sich die Zyklusdauer gegenüber der Prognose laufend verlängert, wird wieder Zeit für die Denitrifikation frei. Es entsteht eine intermittierende Belüftung. Ist der Reaktor einmal gefüllt, steht kein gut abbaubares Substrat für eine schnelle Denitrifikation mehr zur Verfügung. Deshalb wird dann zuerst die Nitrifikation zu Ende geführt, bevor wieder zur Denitrifikation umgeschaltet wird.

Figur 7 zeigt eine Reihe von Zyklen bei Beginn eines Starkregens ohne Vorwarnung. Sobald der Regen beginnt, wird die Denitrifikation (*grün*) abgebrochen und noch so lange nitrifiziert (*rot*), bis die Sedimentation eingeleitet werden muss. Die Ammoniumkonzentration (*rote Kurve*) ist dann noch nicht auf Null gesunken und bleibt während des Dekantierens und somit im Ablauf erhöht. Die nachfolgenden Zyklen sind von Anfang an auf den Regenfluss ausgerichtet und ermöglichen eine vollständige Nitrifikation.

#### DANK

Daniel Braun und Philipp Weber vom Labor für Umweltingenieurwesen der ETH Zürich beteiligten sich mit wertvollen Diskussionen bei der Erarbeitung des Konzepts zur dynamischen SBR-Steuerung. Ein Teil der Entwicklung fand im Rahmen der Masterarbeit von Martin Wettstein am Institut für Umweltingenieurwissenschaften der ETH Zürich statt. Wir danken auch Reto Steinemann von der Chestonag Automation AG für Erläuterungen zur Steuerung der ARA Birs.

Der Verband Abwasserreinigung Oberengadin (ARO) beauftragte uns mit der Planung und dem Bau der ARA Oberengadin und ermöglichte uns somit diese SBR-Steuerung zu entwickeln. Der ARO-Betriebsleiter Godi Blaser prägte die Entwicklung mit fundierten Hinweisen und weitsichtigen Visionen.

#### DER «KRITISCHE ZUFLUSS» ALS ZENTRALE STEUERUNGSGRÖSSE

Die wichtigste Steuerungsgrösse der prognosebasierten dynamischen Steuerung ist, wie oben detailliert beschrieben, der sogenannte «kritische Zufluss». Mit der Wahl des kritischen Zuflusses kann die Gewichtung zwischen hydraulischer Sicherheit und effizienter Reinigung eingestellt werden. Die Wahl muss sorgfältig erfolgen. Wenn er zu klein gewählt ist, d. h. wenn der effektive Zufluss im Mittel höher ist als der kritische Zufluss, kann es passieren, dass der nächste SBR nicht rechtzeitig zur Befüllung bereitsteht. Wird jedoch der kritische Zufluss so gross gewählt, dass die effektive Zuflussmenge weit darunterliegt, wird zu Beginn eine sehr kurze Zyklusdauer prognostiziert und somit keine vorgeschaltete Denitrifikation erlaubt. So wird das leicht abbaubare Substrat aus dem Zulauf energieintensiv aerob veratmet.

Der kritische Zufluss soll möglichst der erwarteten Wassermenge folgen (Tagesgang, Jahresgang, Niederschlag). In der ARA Oberengadin, wo auch der Trockenwetteranfall stark variiert, muss die Wahl

des kritischen Zuflusses automatisiert erfolgen. Dazu wird momentan ein Prognosetool für den Anlagenzufluss entwickelt. Der Betreiber muss nur noch einen Sicherheitsfaktor eingeben, der definiert, wie weit über dem von der Zuflussprognose vorgeschlagenen Wert der kritische Zufluss liegen soll.

#### EINGABEPARAMETER FÜR DIE ProDyn-STEUERUNG

Für den Betrieb der prognosebasierten dynamischen SBR-Steuerung müssen die folgenden Eingabeparameter festgesetzt werden:

- Sicherheitsfaktor für die automatische Festlegung des kritischen Zuflusses.
- Nitratkonzentration, bei der die Denitrifikation abgebrochen werden soll.
- Sicherheitsfaktor für das Erkennen des Endes der Nitrifikation.
- Der minimale Wasserspiegel nach dem Dekantieren.
- Für alle Phasen eines Zyklus werden eine minimale und maximale Zeitdauer festgesetzt, zwischen denen die dynamische Steuerung wirkt.

Messparameter	Messort	Zweck
Zufluss	ARA	Prognose Zyklusdauer
Ammonium	Zufluss SBR-Anlage	Prognose Dauer Nitrifikation
Niveau	jeder SBR	Umschalten Füllen Redundanz für Zuflussmessung
Sauerstoff	jeder SBR	Belüftungsregelung Erkennen Ende Nitrifikation
Drehzahl Gebläse (oder Luftmenge oder Ammonium)	jeder SBR	Erkennen Ende Nitrifikation
Nitrat oder Redox	jeder SBR	Erkennen Ende Denitrifikation
Schlamm Spiegel	jeder SBR	Prognose Dauer Sedimentation
pH	jeder SBR	Erkennen Ende Nitrifikation (zwingend bei weichem Wasser)
TS	jeder SBR und Überschussschlamm	Überwachung und Steuerung Überschussschlammabzug
Temperatur	jeder SBR	Prognose Dauer Nitrifikation

Tab. 2 Notwendige und empfohlene Online-Messungen für die prognosebasierte dynamische SBR-Steuerung.  
Mesures en lignes nécessaires et recommandées pour la gestion dynamique SBR.

– Parameter für die Regelung der P-Fällung, der Kreidedosierung und des Überschussschlammabzugs haben nicht direkt mit der *ProDyn*-Steuerung zu tun.

### MESSTECHNIK

Eine prognosebasierte Steuerung von autonomen dynamischen Reaktoren benötigt Online-Messungen (Tab. 2). Allerdings sind es nicht zwingend mehr als bei einer konventionellen ARA.

Da die Messdaten direkt die SBR steuern oder regeln, müssen die Daten laufend auf ihre Plausibilität überprüft werden. Bei Ausfall einer oder mehrerer zentraler Messungen wird die betroffene Reaktionsphase oder im Extremfall die gesamte SBR-Anlage zeitlich gesteuert.

### POTENZIAL UND HERAUSFORDERUNGEN

Der Abwasseranfall und die Schmutzstofffracht sind dynamisch (Tages-, Wochen- und Jahresgang, Niederschlag). Das SBR-Verfahren bietet im Prinzip die dafür notwendige Flexibilität. Die konventionelle Zeitsteuerung kann diese Flexibilität aber nur unzureichend ausnutzen. Bereits einfache Ansätze zur Dynamisierung verbessern die Leistung. Die in diesem Artikel präsentierte prognosebasierte dynamische SBR-Steuerung (*ProDyn*) geht noch einen Schritt weiter als bisherige Konzepte, indem sie nicht zwischen Belastungsfällen hin und her schaltet, sondern sich stufenlos den Anforderungen anpasst. Idealerweise wird auch eine Prognose des Zuflusses implementiert. Zwingend ist dies, wenn in der ARA Oberengadin kein Vorlagevolumen zur Zwischenspeicherung von Abwasser zur Verfügung steht.

Wie viel besser oder günstiger ist eine SBR-Anlage mit der hier vorgestellten Steuerung im Vergleich zu einer konventionellen Zeitsteuerung? Ein fairer Vergleich ist schwierig. Der Vergleich wird beeinflusst durch die gewählte Zykluslänge und die saisonal unterschiedliche Einteilung des Zyklus bei der Zeitsteuerung sowie die Wahl des kritischen Zuflusses und dem minimalen Wasserspiegel bei der prognosebasierten Steuerung. Die Übertragbarkeit auf andere SBR-Anlagen hängt zudem stark vom Verhältnis der hydraulischen zur Schmutzstoffbelastung ab. Für die ARA Oberengadin wurde mittels dynamischer Simulation des Jah-

resgangs die folgenden Einsparungen im Vergleich zur konventionellen Zeitsteuerung geschätzt: Energieverbrauch der Belüftung 13%, dosierte Kreidemenge 15%. Die Stickstoffelimination erhöhte sich um 11% auf insgesamt 70%. Die Zahlen variieren saisonal. Die Anzahl Gebläse kann nicht reduziert werden. Auch die Grösse der Reaktoren kann nicht reduziert werden, da diese v.a. durch die maximale Wassermenge beeinflusst wird.

Die Vorteile der *ProDyn*-SBR-Steuerung liegen im Tourismusgebiet Oberengadin in der automatischen Anpassung an die Belastung. Für grössere Anlagen im Mittelland sind die Vorteile die jederzeit optimierte Stickstoffelimination und somit der geringere Energieverbrauch. Interessant kann auch sein, dass Ausserbetriebnahme und Störfälle automatisch bewältigt werden.

Ein Nachteil der prognosebasierten dynamischen Steuerung ist die Abhängigkeit von der Messtechnik. Mit einer einfachen computerunterstützten Daten-Plausibilisierung und mit sicheren Rückfallebenen lässt sich dies mit vertretbarem Aufwand lösen.

Wichtig für die Betriebssicherheit ist, dass die Betreiber verstehen, wie die Anlage funktioniert, und beurteilen können, in welchem Zustand sie sich gerade befindet. Daher sind eine aussagekräftige Visualisierung des Anlagezustands

und die Anzeige von Kennzahlen zur freien Kapazität zentral. Ein Simulationsmodell als «Flugsimulator» kann für die Schulung des Betriebspersonals, wie auch zum Testen von Lösungsstrategien bei problematischen Betriebszuständen (*Troubleshooting*), wertvoll sein.

Die ARA Oberengadin wird 2021 den regulären Betrieb aufnehmen. Sobald Betriebserfahrungen zur neuartig gesteuerten SBR-Anlage vorliegen, werden sie zu gegebener Zeit in *Aqua & Gas* publiziert.

### BIBLIOGRAPHIE

- [1] DWA (2009): Merkblatt DWA-M 120 Belebungsanlagen mit Aufstaubetrieb (SBR). Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., 53773 Hennef, Deutschland
- [2] Hug, T. (2017): SBR – von primitiv zu innovativ. VSA-Fachtagung «Mechanisch-biologische Abwasserreinigung», Biel ([www.vsa.ch/publikationen/gratis-download/tagungsberichte/652/](http://www.vsa.ch/publikationen/gratis-download/tagungsberichte/652/))
- [3] Steinemann, R.; Koch, G. (2016): Dynamische SBR-Regelung – Steuer- und Regelkonzept für die Automatisierung von Belebungsanlagen im Aufstau-Betrieb. *Aqua & Gas* Nr. 7/8, (S. 64–72)
- [4] Braun, D. (2018): Messtechnik für Steuerung, Regelung und Prozessüberwachung. VSA-Fachtagung «Abwassermesstechnik im Zeitalter der Digitalisierung», Lenzburg ([www.vsa.ch/publikationen/gratis-download/tagungsberichte/655/](http://www.vsa.ch/publikationen/gratis-download/tagungsberichte/655/))
- [5] ARA Oberengadin ([www.ara-oberengadin.ch](http://www.ara-oberengadin.ch))
- [6] Simba#WaterSimulationsoftware ([simba.ifak.eu/de/content/simba-sharp-water](http://simba.ifak.eu/de/content/simba-sharp-water))

## > SUITE DU RÉSUMÉ

de boue). Les systèmes de gestion SBR dynamique fonctionnent selon le principe «chaque phase dure autant que nécessaire». Le défi est la coordination des réacteurs SBR afin l'un d'eux soit toujours disponible pour le remplissage avec des eaux usées. Le système *PréDyn* est fondé sur des prévisions simples de durée de cycle ainsi que sur un ordre de priorité prédéfini: éviter la perte de boues, traiter l'ensemble des eaux usées, nitrification complète, dénitrification maximale. Dans la région de Haute-Engadine, les avantages de la gestion dynamique basée sur des prévisions résident dans l'adaptation automatique à la grande variabilité de la pollution. Pour les installations situées sur le Plateau, les avantages sont l'élimination de l'azote, optimisée en permanence, et donc une consommation d'énergie moins élevée. Fait intéressant: les mises hors service et les incidents peuvent être résolus automatiquement. Il est fondamental pour la sécurité de fonctionnement que les exploitants comprennent comment l'installation fonctionne et qu'ils puissent à tout moment identifier dans quel état elle se trouve. Une visualisation claire de l'état de l'installation et l'affichage d'indicateurs sont essentiels pour connaître la capacité disponible. Un modèle de simulation, comparable à un «simulateur de vol» peut être utile pour la formation du personnel et tester des stratégies de résolution de problèmes.