

SIMULATIONEN FÜR NACHWEIS DER N-ELIMINATION

WELCHE DYNAMIKEN MÜSSEN SIMULIERT WERDEN UND WIE?

Abwasserreinigungsanlagen müssen in Zukunft deutlich höheren Anforderungen an die Stickstoff-Elimination als bisher genügen. Ebenso wird Nitrit neu als Grenzwert definiert. Es wurden dynamische Simulationen verschiedener Belebtschlammverfahren im Jahresgang durchgeführt. Dabei wurde der Einfluss der Dynamik im Abwasser sowie der Methode zur Erstellung des Jahresgangs aus unvollständigen Messdaten untersucht. Die Unsicherheiten im Hinblick auf den Nachweis der Reinigungsleistung für die Dimensionierung werden diskutiert.

Thomas Hug; Ramun Bär; Kukka Iltanen, Hunziker Betatech AG

RÉSUMÉ

SIMULATIONS POUR LA VÉRIFICATION DE L'ÉLIMINATION DE L'AZOTE

La révision actuelle de la législation nationale sur la protection des eaux prévoit des exigences nettement plus strictes en matière d'élimination de l'azote pour les STEP à l'avenir. De même, le nitrite est désormais soumis à une valeur limite. Les simulations dynamiques de différents procédés à boues activées sur une année civile ont permis de tirer les conclusions suivantes: l'élimination de l'azote ne doit pas être considérée indépendamment du nitrite. À volume égal, les différents procédés biologiques varient par leur performance réalisable. Les procédés à nitrification/dénitrification en plusieurs étapes permettent d'obtenir une élimination de l'azote plus élevée que la dénitrification seule en amont. Toutes les dynamiques étudiées ont une influence considérable sur la performance de traitement simulée ou le volume nécessaire (mode de fonctionnement des procédés, données d'afflux et paramètres environnementaux au cours d'une journée, d'une année et d'une année à l'autre). Le choix de la méthode utilisée pour créer un cycle annuel à partir des données de laboratoire typiques d'une STEP pour la simulation influence le résultat. La méthode courante consistant à utiliser des dimensionnements stationnaires à différentes températures n'est pas suffisante. En ce qui concerne la vérification de la performance d'épuration pour le dimensionnement, les autorités, les STEP, les planificateurs et les instituts de recherche doivent développer ensemble une approche pratique.

EINLEITUNG

ERHÖHTE N-ELIMINATION KOMMT

Schweizer Abwasserreinigungsanlagen (ARA) werden in Zukunft mehr Stickstoff (N) eliminieren müssen. Zusätzlich soll die Ablaufkonzentration von Nitrit neu als Grenzwert festgeschrieben werden. Die Änderung der gesetzlichen Grundlagen war bis Anfang 2026 in Vernehmlassung. Relevante Details wie der exakte Prozentsatz, ob dieser im Jahresmittel gilt und bis zu welchen Temperaturen, sind noch nicht definitiv festgeschrieben. Jedoch kann mit Sicherheit gesagt werden, dass die Denitrifikation sehr stark optimiert werden muss – bei gleichzeitig jederzeitig ausreichender Nitrifikation.

N-ELIMINATION IST DYNAMISCH

Die Prozesse der Nitrifikation und Denitrifikation hängen zusammen und sind sehr dynamisch. Effekte wie Tagesgang, Jahresgang, Regenereignisse, Temperatur, Schmutzstofffrachten und Abwasserzusammensetzung, CSB-/N-Limitierung und hydraulische Aufenthaltszeit beeinflussen den jeweils momentanen Grad der N-Elimination. Um eine erhöhte N-Elimination zu erreichen, muss die Betriebsweise der vorhandenen Beckenvolumen dieser Dynamik angepasst werden. Diese dynamisch betriebenen Verfahren enthalten Sollwerte und Umschaltunkte,

Kontakt: T. Hug, thomas.hug@hunziker-betatech.ch

die ebenfalls dynamisch angepasst werden können.

DYNAMISCHE SIMULATION FÜR DEN NACHWEIS DER N-ELIMINATION

Die biologischen Stufen von ARA werden zurzeit meist statisch, gemäss dem *DWA Arbeitsblatt A 131* [1], dimensioniert. Damit lassen sich aber weder die sehr hohe N-Elimination noch der dynamische Betrieb der biologischen Stufe zuverlässig abbilden. Da die Einflussgrössen, die Prozesse und die Betriebsweise der Verfahren sehr dynamisch sind, wird die dynamische Simulation in Zukunft eine wichtige Rolle für den Nachweis der Eliminationsleistung bei einem Ausbauprojekt spielen.

Die dynamische Simulation ist ein starkes Werkzeug, das bereits heute oft verwendet wird – insbesondere zur Verfahrensoptimierung und zum Vergleich verschiedener Verfahren. Die Resultate solcher Simulationsstudien sind ausreichend für den relativen Vergleich verschiedener Varianten. Sie ergeben jedoch nicht zuverlässige absolute Zahlenwerte der zukünftigen Situation, wie sie für den Nachweis von numerischen Anforderungen wünschenswert wären. Dazu müssten die Modelle sehr viel aufwändiger kalibriert werden, auf der Basis von mehr und aufwändigeren Messungen [2]. Dies ist in der Praxis oft nicht möglich und sogar dann bleiben noch relevante Unsicherheiten bestehen.

Es gibt vermehrt Veröffentlichungen, von Studien, in denen Jahresgänge von ARA simuliert wurden, um die N-Elimination zu ermitteln, z.B. wurden für zwei ARA Unterschiede zwischen den Jahren und verschiedenen Verfahren aufgezeigt [3]. Eine Studie der FHNW [4] im Auftrag des Bundesamts für Umwelt BAFU simulierte mit typischen Jahresgängen den Einfluss der Temperatur und des CSB/N-Verhältnisses auf die notwendige Beckengrösse für die neuen Anforderungen.

Im Hinblick auf einen ausreichenden Nachweis für die neuen Anforderungen, stellen sich noch weitere Fragen wie die folgenden:

- Welche Dynamiken müssen simuliert werden (Tagesgang, Jahresgang, Variation über mehrere Jahre, Betriebsweise der Anlage)?
- Wie stark vermag die Berechnungsmethode des Jahresgangs die Resultate zu beeinflussen?

- Wie kann gezeigt werden, dass sowohl die Anforderung bzgl. N-Elimination als auch bzgl. Nitrit erreicht werden?
- Wie gross ist der Einfluss der verwendeten Modelle, der Kalibrierung?

SIMULATIONSSTUDIE

In diesem Fachartikel wird den ersten drei der oben genannten Fragen nachgegangen.

Im Rahmen einer Variantenstudie für die ARA Pfäffikon (ZH) wurde der Ausbau für zukünftig 24 000 EW untersucht. Ziel der Studie war die Ermittlung des erforderlichen Beckenvolumens für eine 80%-ige N-Elimination mit verschiedenen Verfahrensvarianten des konventionellen Belebtschlammverfahrens. Gleichzeitig wurde eine ähnliche Studie für eine andere Anlage mit 62 000 EW durchgeführt. Die Ergebnisse dieser zweiten Simulationsstudie bestätigen die im Artikel vorgestellten Aussagen.

Zusätzlich war es das Ziel herauszufinden, wie zuverlässig sich die notwendige Beckengrösse bestimmen lässt. Dazu wurden folgende Fragen gestellt:

- Wie hängen die N-Elimination und die Ablaufkonzentration von Nitrit zusammen? Wie kann diese Abhängigkeit dargestellt werden?
- Welche Verfahren sind besser geeignet (vorgeschaltete Denitrifikation, intermittierende Belüftung, A/I-Verfahren)?
- Wie gross ist der Einfluss der dynamischen Betriebsweise (Sollwerte, Umschaltpunkte)?

- Wie gross ist der Einfluss von dem gewählten Jahr für das Erstellen von dem Jahresgang, auf die N-Elimination?
- Die Messdaten der Abwasserzusammensetzung werden einerseits nicht jeden Tag und andererseits als Tagesmittelwerte erhoben. Wie kann daraus ein relevanter Jahres- und Tagesgang erstellt werden? Führen die verschiedenen Methoden zu signifikanten Unterschieden im Resultat der Dimensionierung?
- Welche realen Dynamiken müssen mit simuliert werden, um einen zuverlässigen Nachweis der N-Elimination zu erzielen (Jahresgänge und Tagesgänge der Abwassermengen, der Schmutzstofffrachten, der Temperatur)?
- Wie genau kann die zukünftige N-Elimination nachgewiesen werden?
- Was bedeuten die Erkenntnisse? Und was sind offenen Fragen für den zukünftigen Nachweis für die erhöhte N-Elimination?

MODELLIERUNG

BETRACHTETE VERFAHREN DER BIOLOGISCHEN REINIGUNG

Für die erwähnte Variantenstudie wurden die in *Figur 1* dargestellten Verfahrensvarianten geprüft:

Vorgeschalteten Denitrifikation

Das totale Volumen wurde auf vier gleich grosse Becken aufgeteilt. Die Belüftung der intermittierenden Zone ist über eine

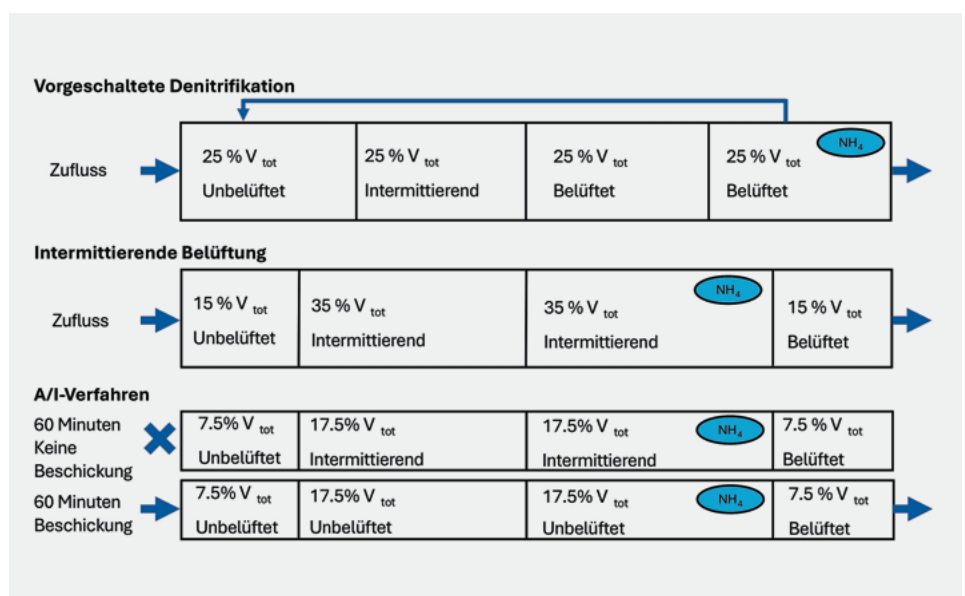


Fig. 1 Schematische Darstellung der drei geprüften Verfahrensvarianten (Nachklärung ist nicht dargestellt). Für alle Verfahren wurden unterschiedliche Belüftungsschaltpunkte abhängig von der NH₄-Konzentration der jeweiligen Sonde ausgewählt.

NH₄-Sonde im Auslauf des letzten Beckens gesteuert. Für die Rückführung des Nitrats wurde die interne Rezirkulation auf den Faktor 3 eingestellt. Der Rücklaufschlammfaktor wurde auf den Faktor 1 eingestellt.

Intermittierende Belüftung

Das totale Volumen wurde auf vier Becken (je 15% unbelüftet, 2 × 35% intermittierend, 15% nachbelüftet) aufgeteilt. Die intermittierende Belüftung ist über eine NH₄-Sonde im Auslauf des dritten Beckens gesteuert. Es gibt keine interne Rezirkulation und der Rücklaufschlammfaktor ist 1.

A/I-Verfahren

Das totale Volumen wurde auf 2 A/I-Strassen aufgeteilt. Jede Strasse wird alternierend, im Stundentakt, beschickt. Jede Strasse hat einen unbelüfteten Selektor, eine intermittierende Belüftung und eine Nachbelüftung. Das nicht-beschickte Becken wird für zehn Minuten dauerbelüftet und danach intermittierend belüftet. Die intermittierende Belüftung wird über eine NH₄-Sonde im des dritten Becken der jeweiligen Strasse gesteuert.

MODELL UND SIMULATIONEN

Die Simulationen wurden auf der Software *Simba#* (Version 5) [5] mit dem mathematisches Modell *ASM3h* durchgeführt. Dies ist das Modell *ASM3* [6], das sehr gut etabliert ist, mit einem für Schweizer Abwasser kalibrierten Parametersatz [7] und mit Anpassungen der Hochschulgruppe (HSG) «Simulation» [8]. Das gleiche Modell und der gleiche Parametersatz wurden in der FHNW-Studie [4] verwendet.

Für jedes der drei biologischen Verfahren (Fig. 1) wurde ein separates Modell erstellt. Folgende Grössen wurden pro Szenario variiert: Totale Beckengrösse, int. Rezirkulation und die Schaltungspunkte für die intermittierende Belüftung in den einzelnen Zonen. Zur Vergleichbarkeit mit anderen Studien wurde die spezifische Beckengrösse in l/EW gekennzeichnet. Die Inputdaten wurden als Zeitreihen eingelesen (Beschrieb in Kap. «Inputdaten für Jahres- und Tagesgang»). Zwischen den Zeitpunkten der Input-Zeitreihen interpolierte das Modell linear. Als rudimentäre Kalibrierung wurde die Schlammproduktion mit Erfahrungswerten anderer ARA abgeglichen. Eine weitergehende Kalibrierung war nicht möglich.

Für die Reinigungsleistung werden folgende Zielgrössen verwendet:

N-Elimination

80% im Jahresmittel über die Biologie. Dies entspricht ungefähr 80% über die gesamte ARA, sofern die Rückläufe aus der Schlammbehandlung unbehandelt in die Biologie zurückgeführt werden.

Nitrit

Maximal 0,3 mgNO₂-N/l im Ablauf der Nachklärung. Da die heutigen Simulationsmodelle Nitrit nicht zuverlässig oder gar nicht simulieren können (so auch das in dieser Studie verwendete Modell), wurde der von der FHNW [4] vorgeschlagene Ansatz verwendet: Die Auswertung von Betriebsdaten verschiedener Schweizer Kläranlagen ergab, dass der Nitrit-Grenzwert eingehalten wird, wenn das 90%-Quantil der Ammoniumkonzentration kleiner als 0,4 mgNH₄-N/l ist (Tagesmittelwerte im Ablauf der Nachklärung).

INPUTDATEN FÜR JAHRES- UND TAGESGANG

MESSDATEN DER ARA

Als Inputdaten für die Simulation wurden Zeitreihen für vorgeklärtes Abwasser mit folgenden Stoffen erstellt: Q, CSB_{tot}, N_{tot}, P_{tot} und Temperatur. Q und Temperatur liegen zeitlich hoch aufgelöst vor. Die Laborwerte wurden alle fünf Tage gemessen.

Von den Fracht-Tageswerten wurden zuerst auffällige Ausreisser entfernt, plausible Extremwerte aber belassen. Die Lücken zwischen den Messintervallen wurden mit dem im Kapitel «Jahresgang» beschriebenen Methoden geschätzt. Die Frachten wurden mit dem Wachstumsfaktor 1,33 auf das Ausbauziel hochgerechnet und mit einer konstanten N-Fracht für die Rückläufe ergänzt.

AUSWAHL DER SIMULIERTEN JAHRE

Abwassermenge und -zusammensetzung sowie die Temperatur sind jedes Jahr anders, ohne langfristigen Trend (Fig. 2).

Für die Simulationen wurden das trockene Jahr 2022 und das nasse Jahr 2024 für den Vergleich ausgewählt. Da beide ein ähnliches CSB/N-Verhältnis aufweisen, sollen Aussagen über den Einfluss von Regenereignissen erzielt werden.

JAHRESGANG

Jahresgänge für Q und Temperatur wurden direkt von den hochaufgelösten Betriebsdaten übernommen. Weiter wurde von einer zukünftig gleichbleibenden Zuflussmenge ausgegangen – dies unter der Annahme, dass Fremdwasser eliminiert wird.

Für die Frachten von CSB_{tot}, N_{tot}, P_{tot} mussten die Werte an den Tagen zwischen den Labormessungen (Tagesmittelwerte) geschätzt werden. Die im Folgenden beschriebenen Methoden wurden verwendet. Für die Tage mit Messwerten werden statt der Schätzungen die Messwerte verwendet.

– Lineare Interpolation:

Die Frachten der Tage zwischen den Messwerten werden linear zwischen den vorhandenen Messwerten interpoliert.

– Q-Korrelation:

Es wurde eine lineare Regression zwischen der Zuflussmenge und der Fracht erstellt (alle Messdaten von 2017–2024). Für die Tage ohne Messwerte wurde damit aus der gemessenen Zuflussmenge eine Zulauffracht geschätzt. Diese Methode wurde in der FHNW-Studie [4] verwendet.

– ARIMA-Modell mit harmonischen Termen:

Mit ARIMA-Modell ist in diesem Artikel die Kombination von einem konstanten

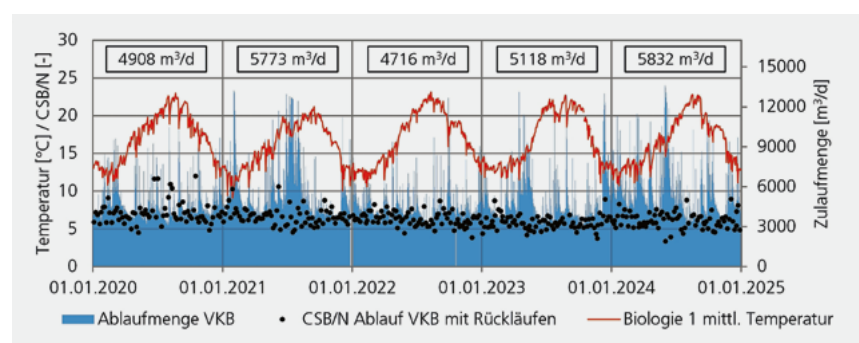


Fig. 2 Zulaufmenge und CSB/N-Verhältnis im Zulauf zur Biologie sowie Temperatur in der Biologie von 2020 bis 2024. Simuliert wurden 2022 und 2024.

Mittelwert, einem Term für wiederkehrende Schwingungen und einem Term für zufällige Abweichungen gemeint. Da Abwasserdaten oft wiederkehrende Muster aufweisen (Wochenrhythmus, saisonale Effekte), bietet sich eine Zerlegung der Daten durch eine *Fourier*-Analyse an.

- Methode «Jahreszeiten»:

Für die Methode «Jahreszeiten» wurden keine Jahresgänge erstellt. Stattdessen wurden mehrere stationäre Simulationen durchgeführt, je mit konstanten Temperaturen von 10 °C, 12 °C, 15 °C und 20 °C. Die Simulationen erfolgten mit konstanter Zulaufmengen entsprechend dem 85%-Quantil der Zulaufmengen des untersuchten Jahres und einem hypothetischen Tagesgang aus dem unten beschriebenen HSG-Tagesgang-Generator [9]. Anschließend wurden die Resultate der N-Elimination entsprechend dem Jahresverlauf der Temperatur gewichtet.

TAGESGANG

Für die Abbildung des Tagesgangs wurde die jeweiligen Tagesmittelwerte der Frachten aus den oben beschriebenen Jahresgängen in Stundenwerte umgerechnet, basierend auf dem in *Simba#* [5] integrierten HSG-Tagesgang-Generator [9]. Dieser berechnet einen hypothetischen Tagesgang auf Grund von Urin, Grauwasser und Fremdwasser. Es wurde angenommen, dass der Tagesgang der Fracht auch bei Regenwetter erhalten bleibt.

Der Tagesgang des Durchflusses stammt von hoch aufgelösten Messdaten (gemittelte Stundenwerte). Ein Tagesgang der Temperatur wurde vernachlässigt, d. h. die Stundenwerte entsprechen der linearen Interpolation zwischen den Tageswerten.

VERGLEICH DER GENERIERTEN INPUT-DATEN

Figur 3 und *4* vergleichen die generierten Inputdaten mit den vorhandenen Messdaten. Die Streuung der linear interpolierten Daten liegt am nächsten bei den Messwerten (*Fig. 3*). Da der tatsächliche Verlauf der Messdaten unbekannt ist, bleibt jedoch offen, ob dies eine gute Schätzung ist.

Die Daten aus der Q-Korrelation weisen eine sehr enge Verteilung auf und sind stark gemittelt (*Fig. 3*). Die Streuung entsteht

v. a. dadurch, dass vorhandene Messwerte direkt übernommen werden (*Fig. 4 links*). Andererseits werden bei starken Regenereignissen möglicherweise unrealistische Frachtstöße generiert (*Fig. 4 rechts*).

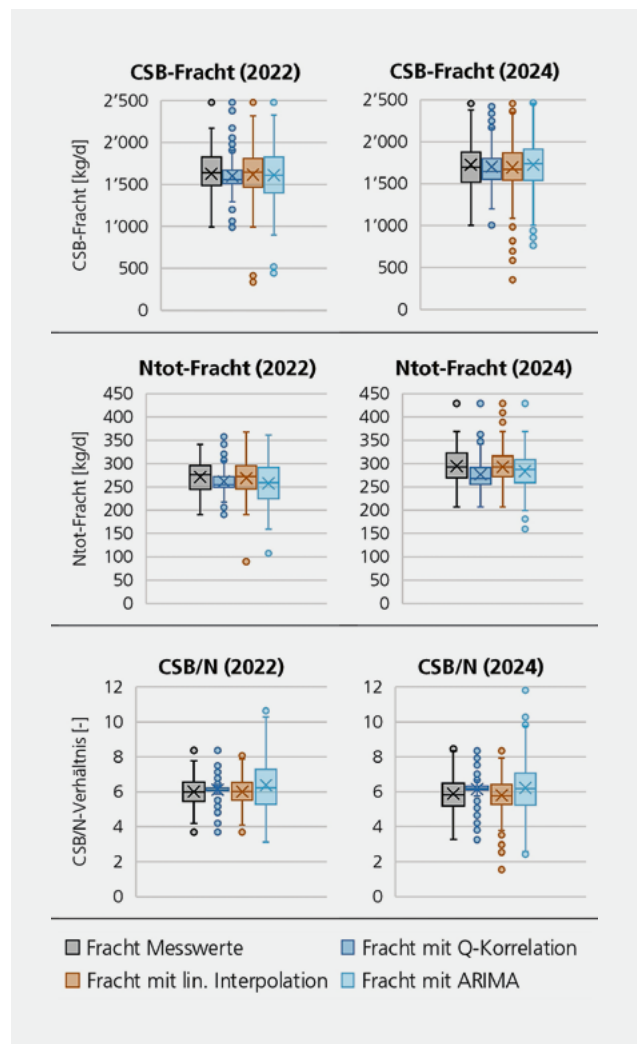


Fig. 3 Vergleich der Inputdaten aus verschiedenen Methoden.

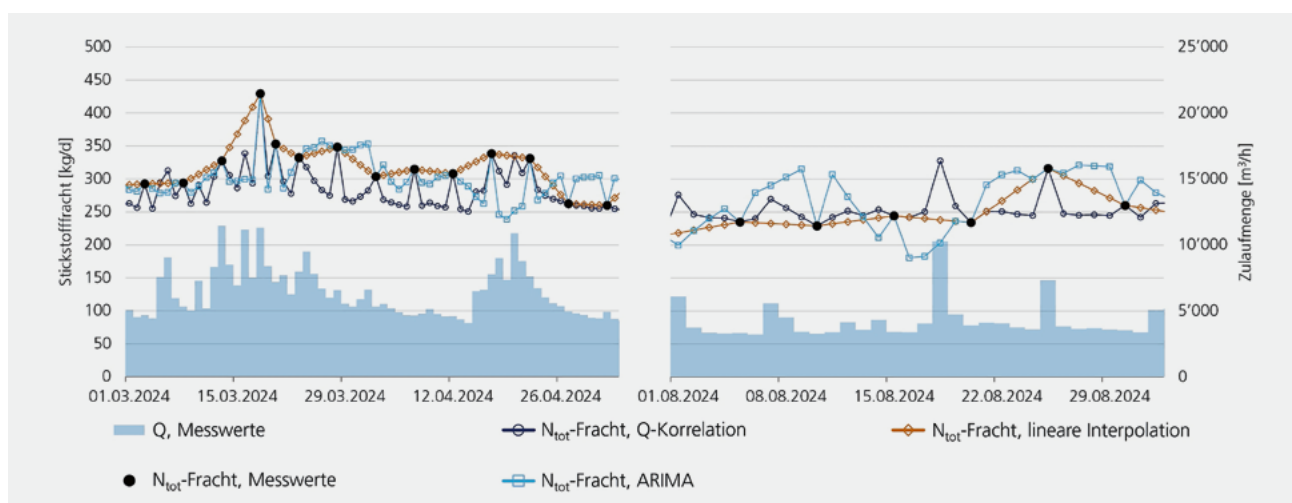


Fig. 4 Ausschnitte der berechneten Zulaufmengen für N_{tot} (Tagesmittelwerte) mithilfe verschiedener Methoden. Die schwarzen Kreise zeigen die vorhandenen Messdaten, die farbigen Punkte die mit den Methoden generierten Werte. Ende März bis Anfang April 2024 gibt es eine Trockenwetterperiode, in der die Zulaufmengen mit der Methode «Q-Korrelation» (dunkelblau) systematisch tiefer sind als die Messwerte. Der hohe Messwert vom 18.3.2024 führt dazu, dass die mit linearer Interpolation berechneten Frachten (braun) über mehrere Tage erhöht sind.

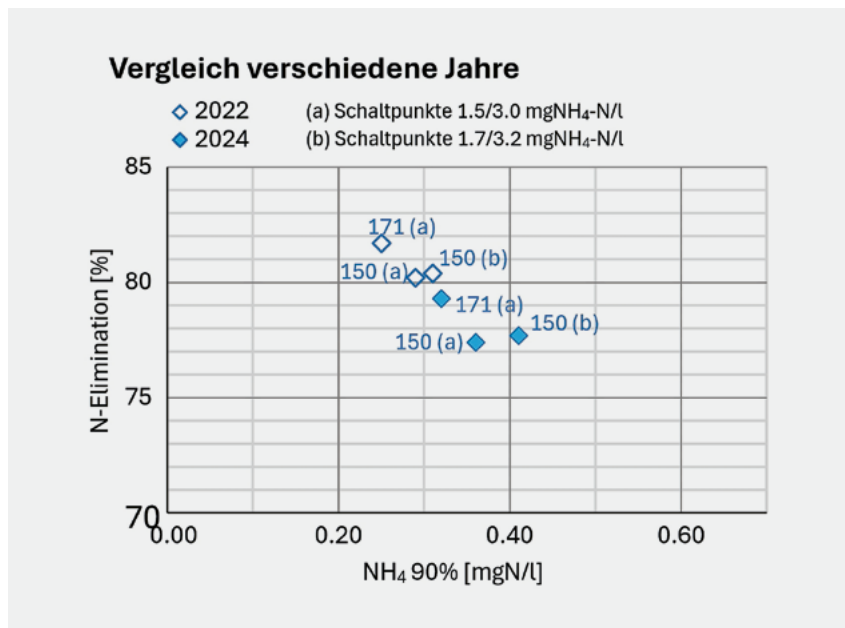


Fig. 6 Vergleich zwischen zwei Jahren für das intermittierende Verfahren und die gleichen Beckengrößen. Bei allen Simulationen wurden die Frachten mit ARIMA interpoliert und mit Tagesgang umgesetzt.

halb bei Regenwetter oft auf intermittierenden Betrieb umgeschaltet, was in der Simulation nicht abgebildet wurde. Natürlich gibt es weitere leistungsstarke Verfahren wie Kaskaden-Denitrifikation und SBR. Die ausgewählten Verfahren zeigen aber die Streubreite deutlich. Es ist zu beachten, dass für jeden Punkt die Betriebsparameter (Ein- und Ausschaltpunkte für die Belüftung je nach Ammoniumkonzentration) optimiert wurden. Bei unveränderten Einstellun-

gen wären die Unterschiede zwischen den Jahren möglicherweise noch grösser. Für eine weitere angepasste Leistungssteigerung können die Anlagen noch dynamischer betrieben werden als hier simuliert (z. B. Bewirtschaftung Vorklä- rung, Faulwasser oder saisonale Einstellungen der Sollwerte). Für die simulierte Betriebsweise ist zu bedenken, dass in der Dimensionierung nicht mehr optimiert werden soll, als im realen Betrieb sicher machbar ist.

VERGLEICH ZWISCHEN VERSCHIEDENEN JAHREN

Im Jahr 2022 wurde generell eine höhere N-Elimination erreicht als 2024. In *Figur 6* sind die Punkte für das intermittierende Verfahren und die spezifischen Beckengrößen von 150 bzw. 171 l/EW herausgesucht. Bei beiden Beckengrößen verbessert sich von 2022 zu 2024 die N-Elimination um rund 2–3% bei gleichzeitiger Verringerung der Ammoniumspitzen. Mit 150l/EW konnten 2022 beide Ziele eingehalten werden, 2024 wurden je nach Betriebsparameter beide verfehlt. Die unterschiedlichen Simulationsergebnisse im Jahr 2022 und 2024 können vor allem auf Unterschiede der Regenmenge, der Temperatur und des CSB/N-Verhältnisses zurückgeführt werden. Das Jahr 2024 war ein besonders regenreiches Jahr (Mittelwert: 5800 m³/d). Das Jahr 2022 war ein trockeneres Jahr (Mittelwert: 4700 m³/d). Das CSB/N-Verhältnis im Jahr 2022 liegt im Mittel bei rund 7,3, im Jahr 2024 bei 7,0. Die mittlere Temperatur im Jahr 2022 beträgt 16,6 °C und im Jahr 2024 16,0 °C (s. *Fig. 2* für einen Vergleich).

VERGLEICH DER METHODEN «JAHRESGANG» UND «TAGESGANG»

In *Figur 7a*) sind mehrere Simulationsergebnisse für das Verfahren intermittierende Belüftung mit konstantem Volumen dargestellt. Die Punkte unterscheiden sich in der Methode zur Erstellung des Jahresgangs und im Jahr. Die betrachte-

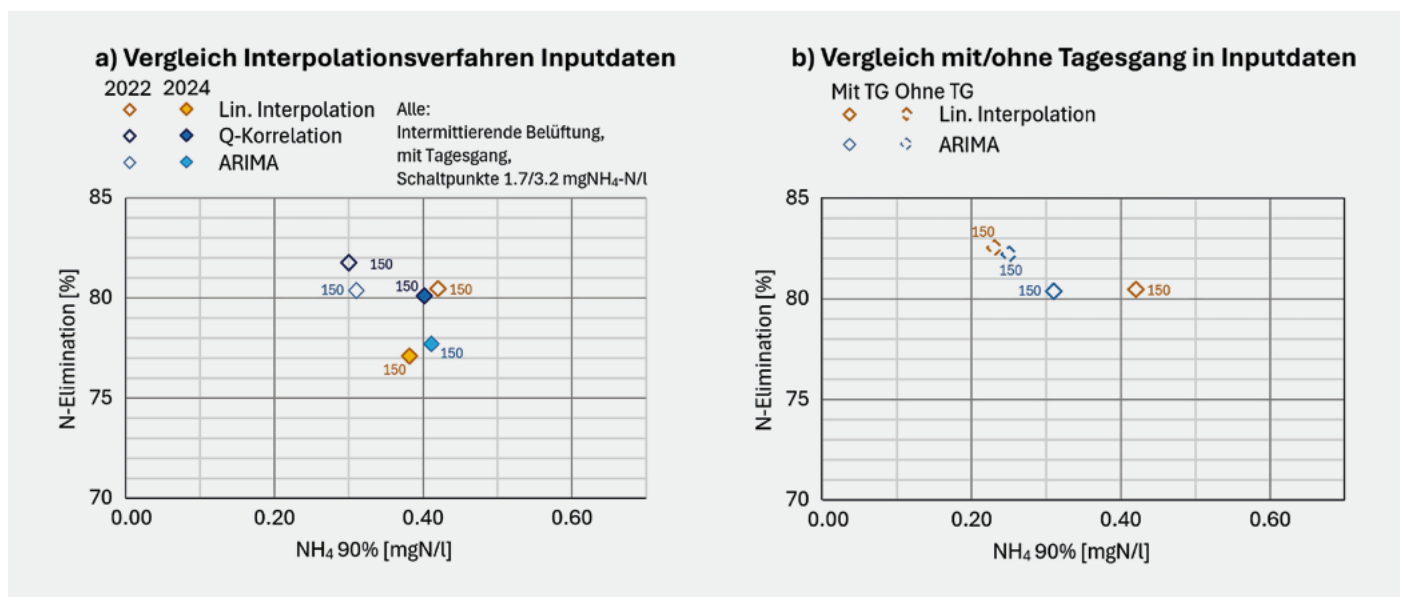


Fig. 7 Vergleich zwischen den drei Methoden für Schätzung von fehlenden Daten für den Jahresgang. Dargestellt sind Resultate für das Verfahren der intermittierenden Belüftung bei 150 l/EW Beckenvolumen mit den gleichen Schaltpunkten für die Belüftungssteuerung. Die leeren Symbole zeigen Resultate für 2022, die ausgefüllten für 2024. Die gestrichelten Symbole zeigen Resultate, bei denen in der Modellierung der Tagesgang (TG) der Frachten vernachlässigt wurde. D. h. es wurde von einer konstanten Tagesfracht ausgegangen.

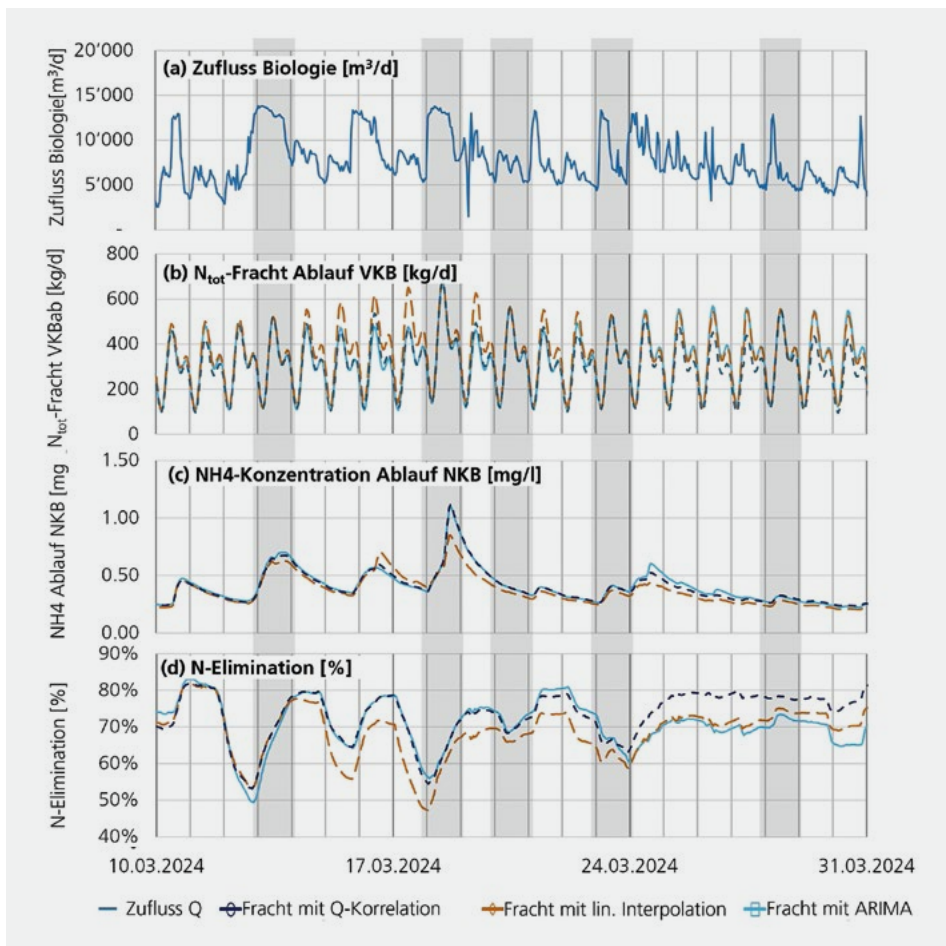


Fig. 8 Ausschnitt der Simulation vom März 2024 mit mehreren Regenereignissen (a).

(b) zeigt die N-Fracht im Ablauf VKB. Deutlich sichtbar ist die Form des virtuellen Tagesgangs. Die Farben unterscheiden die drei verwendeten Methoden für die Erstellung des Jahresgangs. An den grau markierten Tagen, wie z.B. dem 18.3.2024, liegen Labormessungen vor, weshalb alle drei Methoden die gleiche Fracht verwenden. Die Frachten bei linearer Interpolation (braun) sind auch vor- und nach dem Messwert erhöht, während die anderen beiden Methoden tiefer liegen. Die Fracht nach der Methode der Q-Korrelation (dunkelblau) steigt mit jedem Regenereignis an. Mit dem Rückgang des Zuflusses Ende März geht auch die berechnete Input-Fracht zurück, mit Ausnahme des 28.3.2024 aufgrund des vorliegenden Messwerts. Die Fracht aus der ARIMA-Methode (hellblau) folgt den harmonischen Schwingungen und den ARIMA-Thermen.

(c) zeigt die NH_4 -Konzentration im Ablauf NKB mit Spitzen bei jedem Regenereignis, wenn die hydraulische Aufenthaltszeit sinkt.

(d) zeigt die N-Elimination (als gleitender Mittelwert über einen Tag, Zu- und Ablauf um einen Tag versetzt). Es ist sichtbar, dass die erhöhten N-Frachten im Zulauf Mitte Monat nach der Methode der linearen Interpolation (braun) zu einer reduzierten N-Elimination führt und die tiefere N-Fracht Ende Monat nach der Methode der Q-Korrelation (dunkelblau) zu einer erhöhten N-Elimination führt. Bei Beginn von Regen nimmt die N-Elimination jeweils ab, da die Belüftung, aufgrund der erhöhten NH_4 -Konzentrationen, zugunsten der Nitrifikation umgeschaltet wird (Vergleiche 10.3.2024 – 18.3.2024).

ten Methoden führen je nach Jahr zu größeren Unterschieden in der Nitrifikation (2022) oder der N-Elimination (2024). Es fällt auf, dass die höchste N-Elimination, bei gleichem Volumen, in beiden Jahren mit der Methode Q-Korrelation erreicht wurde. Dies kann mit der geringeren Streuung und weniger Extremwerten in den generierten Input-Daten erklärt werden (s. auch Fig. 3). Somit erreicht man mit dieser Methode mit einem klei-

neren Biologievolumen den Nachweis der N-Elimination.

Im Jahr 2024 unterscheiden sich die Resultate der Methoden «Linear interpoliert» und ARIMA nur wenig. Im Jahr 2022 unterscheidet sich vor allem das 90%-Quantil der NH_4 -Ablaufkonzentration. Um diesen Zusammenhang besser zu verstehen, muss die Auswirkung von einzelnen Ereignissen detaillierter betrachtet werden. Figur 8

zeigt die unterschiedlichen Dynamiken und Einflüsse der Methoden an einem Ausschnitt von hochaufgelösten Simulationsergebnissen vom März 2024.»

Figur 7b) zeigt einen Vergleich von Simulationen mit und ohne Tagesgang. Dabei bewegen sich die Punkte ohne Tagesgang nach links oben (verbesserte N-Elimination und Nitrifikation). Somit erzielt eine Modellierung ohne Tagesgang einen Nachweis der N-Elimination schon bei kleineren Beckenvolumen als mit Tagesgang.

VERGLEICH MIT SIMULATION

«JAHRESZEITEN»

Die Resultate der Methode «Jahreszeiten» mit stationären Simulationen (ohne Jahresgang) bei verschiedenen Temperaturen können nicht direkt mit den anderen Simulationsergebnissen verglichen werden. U. a. weil aus Gleichgewichtssimulationen keine sinnvollen Quantile der Ammoniumkonzentration berechnet werden können. Durch die Simulation von konstanten Input-Parametern, kann diese Methode die komplexen Dynamiken der N-Elimination und das Zusammenspiel mit der Nitrifikation nicht genügend abbilden.

Figur 9 zeigt, dass bei konstanter Temperatur (weisse Kreise) die N-Elimination von knapp 73% bei 10 °C bis 85% bei 20 °C ansteigt. Für die Elimination im Jahresmittel müssen die Monate im Jahr diesen Temperaturszenarien zugeordnet werden. Die farbigen Punkte in Figur 9 zeigen vier mögliche Kombinationen. Je nach gewählter Zuordnung variiert die berechnete N-Elimination zwischen 79 und 82%.

NICHT BETRACHTETE UNSICHERHEITEN DER MODELLIERUNG UND DER DIMENSIONIERUNG

Es wurden verschiedene Einflüsse auf den Nachweis des notwendigen Biologievolumens mittels Simulationen diskutiert. Zusätzlich sind noch folgende relevante Unsicherheiten zu beachten, die hier nicht diskutiert werden: Auswahl des Modells, Kalibrierung des Modells sowie die Qualität und Aussagekraft der Messdaten. Die grösste Unsicherheit liegt jedoch oft bei der Festlegung des Ausbauziels. Die verbreitete statische Dimensionierung nach DWA-A 131 [1] enthält implizite Sicherheitsfaktoren. Bei der dynamischen Simulation ist dies nicht der Fall. Der Optimierungsgrad der Simulationen kann gewisse Sicherheit geben. Wie stark bei Simulationen schon zu optimieren ist, muss diskutiert werden.

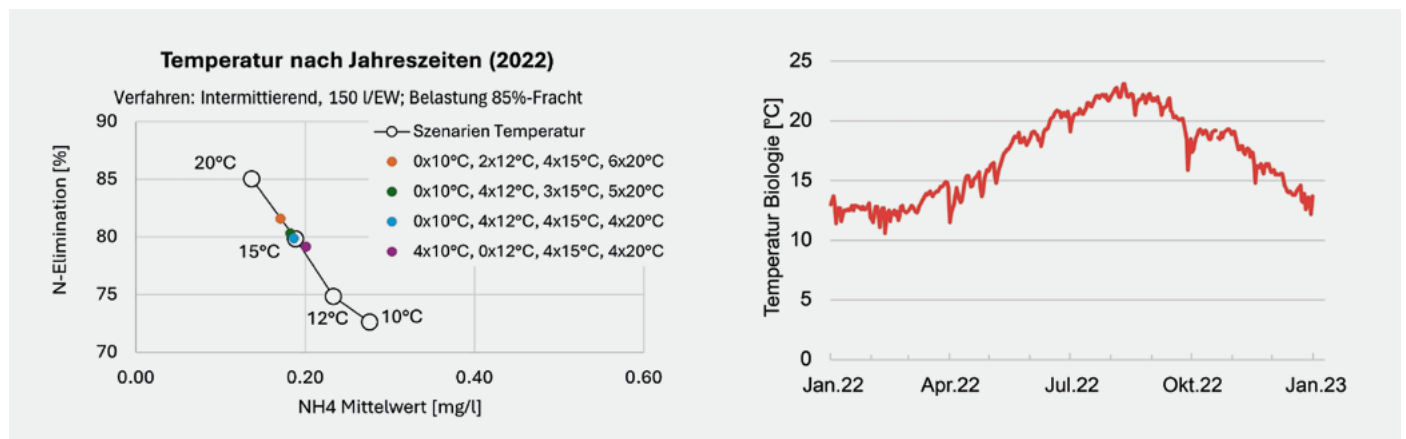


Fig. 9 Resultate mit der Berechnung nach Jahreszeiten. In der linken Grafik zeigen die weissen Kreise die Resultate der einzelnen Simulationen bei verschiedenen konstanten Temperaturen für eine intermittierende Belüftung bei einer Beckengrösse von 150 l/EW. Die Y-Achse zeigt die N-Elimination, die X-Achse die mittlere (!) Ammoniumkonzentration im Ablauf statt des 90%-Quantils. Die farbigen Punkte zeigen die Resultate für vier unterschiedliche Kombinationen der Monate auf die verschiedenen Temperaturbereiche. Lesebeispiel: Der blaue Punkt entspricht dem Mittel aus je vier Monaten 12 °C, 15 °C und 20 °C. Zum Vergleich ist rechts der Temperaturverlauf von 2022 dargestellt.

FAZIT

Mit dynamischen Simulationen verschiedener Belebtschlammverfahren im Jahresgang fand eine Untersuchung des Einflusses verschiedener Dynamiken des Abwassers und der Prozesse ebenso wie der Methode zur Erstellung eines Jahresgangs aus unvollständigen Messdaten statt. In Bezug auf die eingangs gestellten Fragen ergibt sich folgendes Fazit:

- Die Resultate zeigen deutlich, dass die N-Elimination nicht unabhängig von Nitrit betrachtet werden darf. Die Autoren erachten die grafische Darstellung mit den beiden Zielgrössen auf den Achsen als übersichtlich und transparent. Die Verwendung des 90%-Quantils der Ammoniumkonzentration im Ablauf gemäss FHNW [4] anstelle des nicht zuverlässig simulierbaren Nitrits ist in Zukunft zu prüfen.
- Die verschiedenen biologischen Verfahren unterscheiden sich, bei gleichem Volumen, in der erreichbaren Leistung. Die reine vorgeschaltete Denitrifikation ist in der Leistung limitiert. Verfahren mit einer mehrstufigen Nitrifikation/Denitrifikation erreichen eine höhere N-Elimination.
- Generell wird sowohl die N-Elimination als auch die Nitrit-Ablaufkonzentration mit grösserem Volumen besser. Es ist zu beachten, dass die Wahl der Betriebsparameter (z. B. Sollwerte, Umschaltpunkte) einen grossen Einfluss auf das notwendige Volumen haben.
- Die Unterschiede von Jahr zu Jahr sind relevant (u. a. CSB/N, Temperatur, Regenspitzen). Deshalb müssen für eine

aussagekräftige Dimensionierung mehrere Jahre simuliert werden.

- Für den Nachweis einer hohen N-Elimination ist es relevant, den Jahres- und den Tagesgang bei der Simulation zu berücksichtigen.
- Die Wahl der Methode zur Erstellung eines Jahresgangs aus den nicht täglichen Labordaten einer ARA als Input für die Simulation hat einen relevanten Einfluss auf das Resultat. Die verbreitete Methode mit stationären Simulationen bei verschiedenen Temperaturen («Jahreszeiten») ist nicht ausreichend.
- Alle in der Studie unterschiedenen Dynamiken haben einen signifikanten Einfluss auf die simulierte Reinigungsleistung bzw. das notwendige Volumen. Dies sind die Betriebsweise der Verfahren, Zuflussdaten und Umweltparameter im Tagesgang, Jahresgang und von Jahr zu Jahr. Es ist zu erwarten, dass nicht berücksichtigte Faktoren wie Veränderung der CSB-Fraktionierung und die dynamische Bewirtschaftung von VKB und Rückläufen ebenfalls einen zu beachtenden Einfluss haben.
- Weitere Unsicherheiten wie z. B. Messdaten, verwendetes Modell, Kalibrierung wurden nicht betrachtet.
- Im Hinblick auf den Nachweis der Eliminationsleistung in Zukunft ist die dynamische Simulation im Jahresgang notwendig. Es stellen sich aber Fragen wie: Welche Messungen sind notwendig? Wie komplex muss die Simulation sein? Und wie kann die Behörde die Qualität des Nachweises nachvollziehen? Es müssen Empfehlungen zum Vorgehen und zu den massgebenden

Zielwerten entwickelt werden, die für ARA-Betreiber, Planer und auch Behörden pragmatisch umsetzbar sind.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] DWA (2016): Arbeitsblatt DWA-A 131: Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), 53773 Hennef, Deutschland
- [2] Rieger L. et al. (2013): Guidelines for Using Activated Sludge Models. Scientific and Technical Report No. 22. IWA Publishing, London UK
- [3] Shopova, Y.; Gautschi, S. (2025): Stickstoffelimination: Mit Simulation zum Ziel - Mit dynamischer Simulation geeignete Strategie zur erweiterten Reinigungsleistung finden. Aqua & Gas 4/2025: 56–60
- [4] FHNW (2025): Einfluss der Abwassereigenschaften und Platzverhältnisse einer ARA auf die Stickstoffelimination gemäss Motion 20.4261, Fachhochschule der Nordwestschweiz (FHNW) im Auftrag des BAFU 17.10.2025
- [5] <https://www.ifak.eu/de/produkte/simba>
- [6] Henze, M. et al. (2000): Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2D and ASM3. IWA Scientific and Technical Report No.9. IWA Publishing, London, UK
- [7] Koch, G. et al. (2000): Calibration and validation of Activated Sludge Model No. 3 for Swiss municipal wastewater. Water Research 34(14): 3580–3590
- [8] Alex, J. et al. (2007): A method to use dynamic simulation in compliance to stationary design rules to refine WWTP planning. In: Proceedings 10th IWA Specialised Conference on Design, Operation and Economics of Large Wastewater Treatment Plants, 10–13 September 2007, Vienna, Austria (<http://www.hsgsim.org/>)
- [9] Langergraber, G. et al. (2007): Generation of diurnal variation for influent data for dynamic simulation. Water Science & Technology 57(9): 1483–1486