

STICKSTOFFELIMINATION IN SCHWEIZER ARA

WEITERE ENTLASTUNG DER OBERFLÄCHENGEWÄSSER

Mit dem Abwasser gelangen pro Jahr rund 41 000 t Stickstoff (N) in die Schweizer Kläranlagen. Davon werden heute etwa 18 000 t in den ARA eliminiert. Mit Hilfe einer Kombination von neu entwickelten Reinigungsverfahren, die zum Teil bereits gut etabliert und auf dem Stand der Technik sind, liessen sich die Oberflächengewässer im Inland um weitere 6600 t Stickstoff entlasten, wie die vorliegende Studie zeigt. Bei Ausschöpfung des Reduktionspotenzials in den 160 grösseren ARA ist mit Gesamtinvestitionen von 344 Mio. Franken und jährlichen Betriebskosten von 27 Mio. Franken zu rechnen.

Sabrina Strähl*; Christoph Ort; Hansruedi Siegrist, Eawag
Michael Thomann*; Johanna Obrecht; Eileen Kurz, Holinger AG

RÉSUMÉ

ÉLIMINATION DE L'AZOTE DANS LES STEP SUISSES – POURSUITE DE LA DÉCONTAMINATION DES EAUX DE SURFACE

Du point de vue de la protection des eaux, l'optimisation continue de l'élimination de l'azote dans les stations d'épuration des eaux usées (STEP), et par la même une meilleure protection des écosystèmes et ressources en eau potable reste essentielle. L'exigence concernant l'azote total dans l'annexe 3.1 de l'Ordonnance sur la protection des eaux œuvre dans ce sens. Elle exige en effet que les stations pour lesquelles aucune valeur n'est fixée pour la concentration dans les eaux déversées, ni pour le taux d'épuration doivent être exploitées de façon à éliminer la plus grande quantité d'azote possible. De nouveaux procédés techniques, comme par exemple la technologie SBR (*Sequencing Batch Reactor*) ou le procédé en alternance/intermittent (a/i), ainsi que des progrès dans le domaine des techniques de mesure de procédés permettent des performances d'élimination pouvant dépasser les 70% dans des conditions d'exploitation optimales. Aujourd'hui, les STEP suisses éliminent l'azote qu'elles reçoivent à 44% en moyenne. En utilisant les options de réduction évoquées, les performances moyennes d'élimination pourraient être augmentées à 60%. Cela correspondrait à une baisse de la charge en azote rejetée dans les eaux de 6600 tonnes supplémentaires par an. Les coûts d'investissement supplémentaires pour la réalisation de toutes les possibili-

EINLEITUNG

Der Eintrag von Stickstoffverbindungen durch menschliche Aktivitäten in die Gewässer ist möglichst zu minimieren, da sie bei Wasserlebewesen zu nachteiligen Wirkungen führen können. Dies betrifft Ableitungen von Abwasser, diffuse Einträge durch die Landwirtschaft sowie Emissionen aus Verbrennung und Verkehr. Gemäss der Gewässerschutzverordnung (GSchV) muss die Wasserqualität von Fließgewässern so beschaffen sein, dass Laichgebiete für Fische erhalten bleiben und das Wasser bei Infiltration das Grundwasser nicht verunreinigt [1]. Von Bedeutung sind in diesem Zusammenhang die Stickstoffverbindungen Ammonium und Ammoniak sowie Nitrit und Nitrat. Ammonium wird im Gewässer zu Nitrit und anschliessend zu Nitrat oxidiert. Je nach Wassertemperatur und pH-Wert liegt ein kleinerer oder grösserer Anteil des Ammoniums als Ammoniak vor. Für Fische sind Nitrit und Ammoniak bereits in tiefen Konzentrationen giftig, was sich insbesondere negativ auf die Fortpflanzung und Entwicklung empfindlicher Organismen wie Salmoniden (Lachsfische) auswirkt [2].

Nitrat ist insbesondere für die Trinkwassergewinnung von Bedeutung. Im schweizerischen Mittelland liegen die NO_3 -Konzen-

* Kontakt: sabrina.straehl@eawag.ch; michael.thomann@holinger.com

Titelbild: ARA Birs (Foto: Holinger AG)

trationen im Grundwasser immer noch vielerorts über dem Anforderungswert der GSchV von 25 Milligramm pro Liter (mg/l) und teilweise sogar über dem Toleranzwert von 40 mg/l [3]. In Fließgewässern mit Infiltration ins Grundwasser sind zum Schutz der Trinkwasserressourcen deshalb möglichst tiefe Nitratkonzentrationen anzustreben.

NEGATIVE AUSWIRKUNGEN AUF DIE MEERE

Vor allem in den maritimen Küstengebieten begünstigt ein übermässiger Stickstoffeintrag das starke Wachstum der Algen. Die Ausscheidung von Algengiften und der Sauerstoffmangel durch den Abbau abgestorbener Biomasse haben verheerende Folgen für die Flora und Fauna der Meere [2] – so zum Beispiel auch in der Nordsee (Fig. 1). Im Rahmen der Internationalen Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR) sowie des Übereinkommens zum Schutz der Meeresumwelt im Nordostatlantik (OSPAR) beteiligt sich die Schweiz deshalb an Programmen zur Reduktion des Stickstoffeintrags in diese Gewässer. Für die Einleitung von Abwasser aus zentralen Kläranlagen im Rheineinzugsgebiet legt die GSchV daher strengere Anforderungen fest. Dank ihrer Umsetzung konnte die Schweiz die jährlichen Stickstoffeinträge in den Rhein bis 2005 um 2600 t reduzieren. Damit hat der Bund sein strategisches Ziel zur Minderung der Stickstoffemissionen



Fig. 2 Die ARA Birs in Birsfelden (BL) ist 2007 umfassend erneuert und ausgebaut worden. Mit ihren fünf SBR-Reaktoren zur weitergehenden Stickstoffentfernung gehört sie europaweit zu den grössten Kläranlagen, welche diese Technologie nutzen

La STEP Birs à Birsfelden (BL) a été rénovée et transformée en 2007. Avec ses cinq réacteurs SBR pour une élimination poussée de l'azote, elle fait partie des plus grandes stations d'épuration en Europe utilisant cette technologie

(Foto: Holinger AG)

im Abwasserbereich erreicht [4]. Heute eliminieren die inländischen ARA im Durchschnitt 44% des Stickstoffs [5]. Bei Anlagen im Rheineinzugsgebiet liegt die Eliminationsleistung aufgrund der besonderen Auflagen mit 52% etwas höher [5]. Die Strategie des Bundes umfasst neben der Abwasserreinigung auch Massnahmen zur Reduktion von schädlichen Stickstoffverbindungen in den Bereichen

Landwirtschaft, Verkehr und stationäre Verbrennungsprozesse. Diese Quellen und ihr Beitrag zur Minderung der Stickstofffrachten sind nicht Gegenstand der vorliegenden Studie. An der Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon läuft derzeit jedoch ein Projekt zur Abschätzung dieser diffusen Einträge. Damit sollte es später möglich sein, auch für solche Quellen die Reduktionspotenziale aufzuzeigen.



Fig. 1 Zum Schutz der Küstengebiete an der Nordsee vor Überdüngung beteiligt sich die Schweiz an internationalen Programmen zur Reduktion des Stickstoffeintrags in die Fließgewässer im Rheineinzugsgebiet

Pour protéger le littoral de la Mer du Nord contre la surfertilisation, la Suisse participe à des programmes internationaux en faveur de la réduction des rejets en azote dans les cours d'eau du bassin versant du Rhin

(Foto: M. Nolte)

ANALYSE DES REDUKTIONSPOTENZIALS

Aus Sicht des Gewässerschutzes ist es sinnvoll, die Stickstoffelimination in den Abwasserreinigungsanlagen (ARA) weiter zu optimieren, um dadurch Ökosysteme und Trinkwasserressourcen besser zu schützen. In diese Richtung zielt die Anforderung bezüglich Gesamtstickstoff im Anhang 3.1 der Gewässerschutzverordnung. Sie verlangt, dass Anlagen, für die keine Abflusskonzentration und kein Reinigungseffekt für Gesamtstickstoff festgelegt sind, bei der Abwasserreinigung und Schlammbehandlung möglichst viel Stickstoff eliminieren. Die vorliegende Studie analysiert das zusätzliche Potenzial zur Stickstoffreduktion in ARA und schätzt die zu erwartenden Kosten ab.

Dank Fortschritten der Prozessmesstechnik haben sich die technischen Verfahren und die Prozessführung zur weitergehenden Stickstoffentfernung in den letzten Jahren in der Praxis gut etabliert – so

zum Beispiel die SBR-Technologie (*Sequencing Batch Reactor*) oder das alternierend-intermittierende (A/I)-Verfahren (Fig. 2). Bei optimalen Betriebsbedingungen lassen sich damit Eliminationsraten von über 70% erreichen [6]. Zudem können die Betreiber mit einer separaten Faulwasserbehandlung eine erhebliche Menge an zusätzlichem Stickstoff entfernen.

KOMBINATION ZWEIER BERECHNUNGSMODELLE

Um den Gesamteintrag in die Gewässer zu beziffern, sind Stickstoffablaufwerte aller ARA erforderlich. Die gemessenen Frachten liegen aber nur für rund 40% sämtlicher Kläranlagen vor. Deshalb erfolgt die Abschätzung der N-Frachten mit Hilfe eines Modells anhand des Ausbaustandards und einer normierten Zulauffracht. Als Basis für die Verteilung der Stoffflüsse in verschiedenen Einzugsgebieten dient die Modellstruktur aus der Stoffflussanalyse für Mikroverunreinigungen [7]. Die

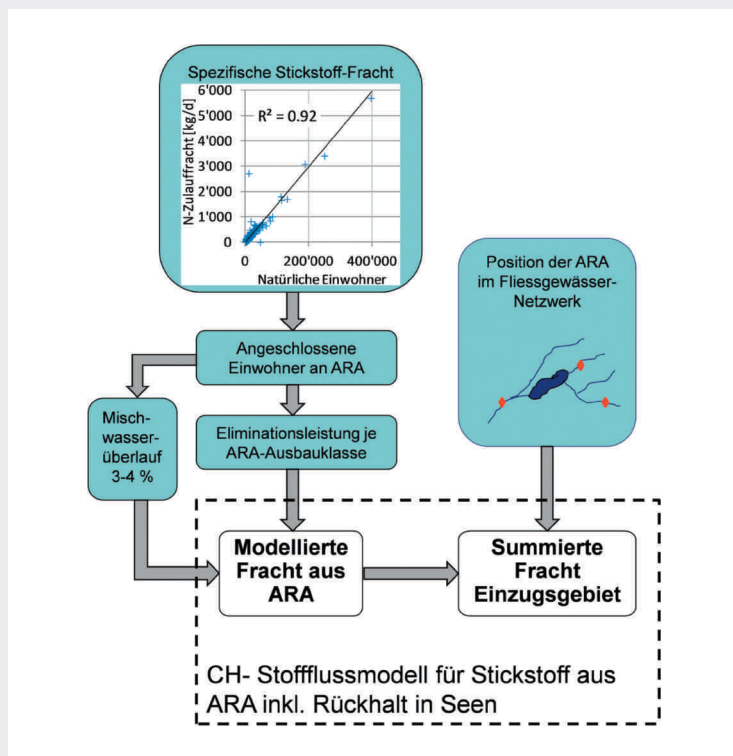


Fig. 3 Schema des Stoffflussmodells

Schéma du modèle de flux des substances

ARA > 10 000 Einwohnerwerte (EW)	Median	Standardabweichung der Daten	Anzahl der Stichproben
Spez. Stickstofffracht [g/E*d]	13,9	7,6	233
Stickstoffelimination der ARA mit Kohlenstoffabbau	37%	19%	40
Stickstoffelimination der ARA mit Nitrifikation	35%	11%	32
Stickstoffelimination der ARA mit Denitrifikation	49%	20%	45
Stickstoffelimination der ARA mit erhöhter Denitrifikation	77%	4%	14

Tab. 1 Stickstoffelimination der Kläranlagen im Inland in Abhängigkeit ihres unterschiedlichen Ausbaugrads (Datenquelle: VSA-Kennzahlen 2011 [5])

Élimination de l'azote dans les stations d'épuration au niveau national en fonction du degré d'équipement respectif (source: indicateurs VSA 2011 [5])

wichtigsten Seen, die ebenfalls einen Beitrag zur Stickstoffelimination leisten, sind im Modell integriert. So lassen sich die Stickstofffrachten aus ARA an jedem Punkt im Gewässernetz berechnen und mit den zum Teil vorliegenden Messungen vergleichen.

Zusätzlich hat man ein Kostenmodell entwickelt, um – in Abhängigkeit des Ausbaugrads der biologischen Reinigung – den zusätzlichen finanziellen Aufwand für eine weitergehende Stickstoffelimination ermitteln zu können. Mit den beiden Modellen ist es möglich, die Auswirkungen verschiedener Reduktionsoptionen auf die Frachten und Kosten zu berechnen.

ABSCHÄTZUNG DER STICKSTOFFFRACHTEN

Eingangsgrossen des Modells zur Frachtberechnung bilden die angeschlossenen Einwohner jeder ARA, die Stickstofffracht pro Person, der Ausbaugrad sowie die Lage aller Kläranlagen im schweizerischen Gewässernetz. Weitere Modellkomponenten sind der Eintrag aus Mischwasserüberläufen und der Stickstoffrückhalt in Seen. Der Modellaufbau ist in Fig. 3 dargestellt. Die spezifische Stickstofffracht pro Einwohner im Zulauf zur ARA hat man aus dem Datensatz des VSA-Kennzahlenprojekts [5] ermittelt. Sie beträgt 13,9 g Stickstoff pro Kopf und Tag und liegt damit etwa 15% höher als die aus dem üblicherweise verwendeten Dimensionierungswert berechnete N-Fracht von rund 12 g [8].

Entsprechend der Kategorisierung in der ARA-Datenbank erfolgte eine Einteilung der Kläranlagen gemäss ihrem jeweiligen Ausbaugrad, wobei nach «Kohlenstoffabbau», «Nitrifikation» und «Denitrifikation» differenziert wird (Fig. 4). ARA, die bereits mehr als 70% Stickstoff eliminieren, erhielten den zusätzlichen Ausbaugrad «Erhöhte Denitrifikation» zugesprochen. Sie lassen sich mit den europäischen Abwasserreinigungsanlagen an empfindlichen Flüssen vergleichen, die 70 bis 80% Stickstoffelimination erreichen müssen [9]. Die im Modell angenommenen Eliminationsleistungen für die verschiedenen Ausbaugrade sind aufgrund der vorhandenen Zu- und Ablaufdaten [5] bestimmt worden (Tab. 1).

Um verschiedene Optionen des Reduktionspotenzials zu berechnen, hat man die ARA zusätzlich in verschiedene Grössenklassen unterteilt. Fig. 4 zeigt die Anzahl Kläranlagen pro Grössenklasse sowie ihren jeweiligen Ausbaugrad.

Im Mittel gelangen 3 bis 4% der berechneten Zulauffracht jeder Kläranlage über Mischwasserüberläufe direkt in die Gewässer [10]. Um Aussagen zu einem bestimmten Einzugsgebiet zu ermöglichen, sind die berechneten ARA-Frachten über das Fließgewässernetz aufsummiert worden – und zwar unter Berücksichtigung der Stickstoffelimination relevanter Seen. Tabelle 2 gibt die Eliminationsraten für verschiedene Trophiegrade an und listet die Schweizer Seen auf, mit Hilfe derer man typische Eliminationswerte ermittelt hat.

Drei Faktoren beeinflussen den Stickstoffrückhalt in Seen: die Denitrifikation, die Sedimentation und die Stickstoffaufnahme über die Pflanzen, wobei Letztere vernachlässigbar ist [18]. Den grössten Einfluss auf den Rückhalt hat die Denitrifikationsrate [18, 19], welche positiv mit der Nitrat-Konzentration im Seewasser korreliert [20, 21, 22]. Für die Denitrifikation ist das Angebot an gelöstem oder partikulärem Kohlenstoff massgebend. Die Netto-Sedimentation von partikulären Stickstoffkomponenten nimmt mit steigendem Trophiegrad zu [21].

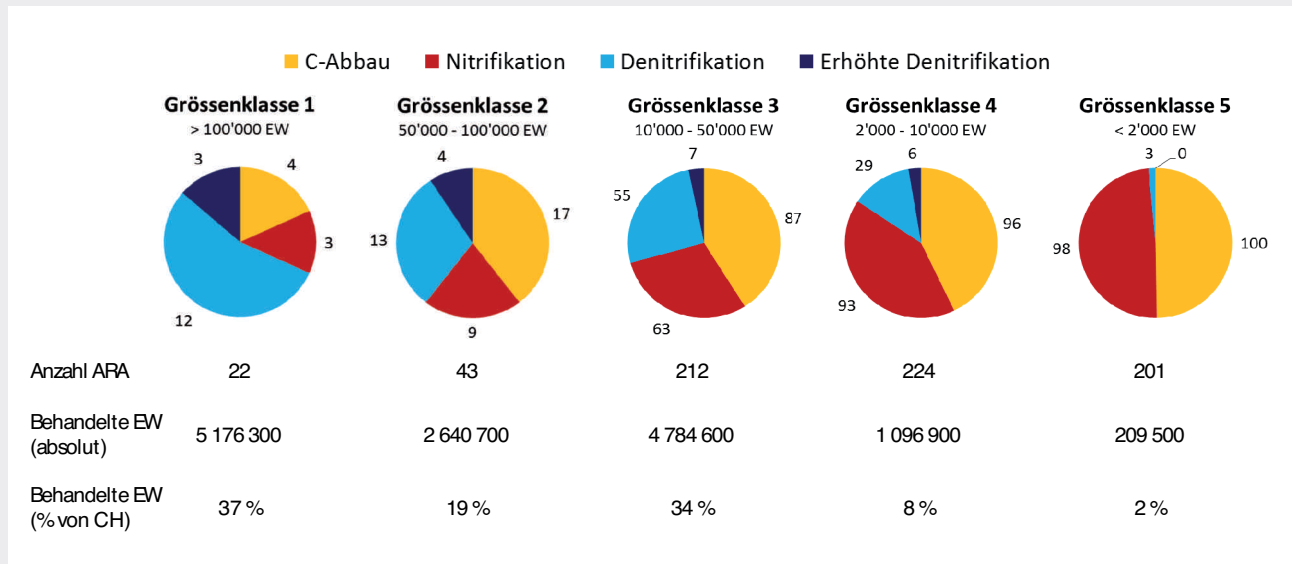


Fig. 4 Klassierung der Schweizer Kläranlagen nach ihrer Ausbaugrösse (EW = 120 g CSB/d im Rohabwasser)
 Classification des stations d'épuration suisses selon leur dimensionnement (EW = 120 g DCO/j dans les eaux bruts)

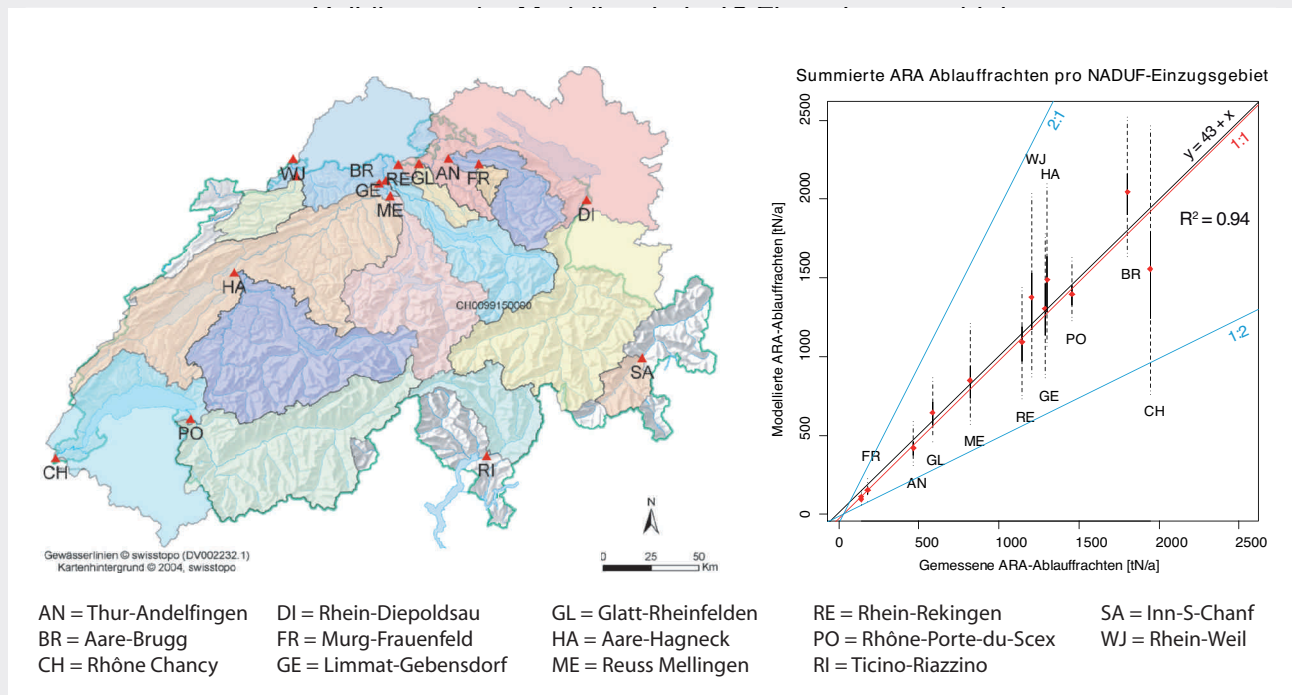


Fig. 5 Vergleich zwischen den summierten, modellierten ARA-Ablaufmengen und den summierten, gemessenen ARA-Ablaufmengen in 12 Flusseinzugsgebieten. Sowohl für die gemessenen als auch für die modellierten Mengen hat man nur Kläranlagen im Einzugsgebiet aufsummiert, für die Messwerte vorliegen. Im Durchschnitt decken diese 70% der angeschlossenen Einwohner ab. Die Unsicherheiten sind als Linien dargestellt (ausgezogen = 50%, gestrichelt = 90% der Werte)

Comparatif entre les charges modélisées cumulées et les charges mesurées cumulées des rejets de STEP dans 12 bassins versants de cours d'eau. Seules les stations d'épuration du bassin versant disposant de valeurs mesurées ont été prises en compte dans le calcul cumulé des quantités modélisées et mesurées. En moyenne, elles couvrent 70% des habitants raccordés au réseau. Les incertitudes sont représentées sous forme de lignes (continues = 50%, pointillées = 90% des valeurs)

MODELLVORHERSAGEN

Bedingt durch die Unsicherheitsbereiche der einzelnen Eingangsgrössen ergibt sich auch für die Modellvorhersage eine relativ grosse Bandbreite. Um das Gesamtausmass der möglichen Abweichungen abschätzen zu können, bediente man sich einer Monte-Carlo-Simulation. Die zufällig

gezogenen Werte für die spezifische Stickstofffracht und die Eliminationsleistung in den ARA erfolgte dabei empirisch aus den vorhandenen Messdaten, während man für den Stickstoffabbau in Seen (vgl. Wertebereich, Tab. 2) und den Mischwasserüberlauf konservativ von einem breit angenommenen Intervall ausging.

Als Ergebnis der Monte-Carlo-Simulation resultiert eine Verteilung der modellierten Stickstofffrachten für verschiedene Flusseinzugsgebiete. In Figur 5 sind die resultierenden 90%-Vertrauensintervalle für zwölf verschiedene Einzugsgebiete dargestellt. Als Vergleichsgrösse dienen die aufsummierten, gemessenen ARA-Ab-

Trophiegrad	Seen für die Ermittlung	Wertebereich für die Stickstoffelimination	Quellen
oligotroph	Vierwaldstättersee Walensee	10 bis 30%	[11] [12]
mesotroph	Genfersee Zürichsee Bodensee	30 bis 60%	[13] [12] [14]
eutroph	Greifensee Zugersee Baldeggersee	60 bis 80%	[12] [15] [15]

Tab. 2 Verwendete Modellwerte für die Stickstoffelimination in Seen. Die Bestimmung des Trophiegrades erfolgte anhand der P-Konzentration [16] und der Klassierung gemäss [17]. Der Bodensee ist heute oligotroph, war aber zum Zeitpunkt der Datenaufnahme noch in einem mesotrophen Zustand

Valeurs modélisées utilisées pour l'élimination de l'azote dans les lacs. La détermination du niveau trophique a été réalisée en se basant sur la concentration P [16] et la classification selon [17]. Le Lac de Constance est aujourd'hui oligotrophe, mais était encore en situation mésotrophe au moment des relevés de données

lauffrachten – basierend auf den Jahresmittelwerten der VSA-Kennzahlen [5] – für die jeweiligen Flusseinzugsgebiete. Dabei gilt es zu beachten, dass sich die Unsicherheitsbereiche in Gebieten mit einem oder mehreren Seen vergrössern, da die Eliminationsraten in diesen Gewässern oft stark variieren. Insgesamt erreichen das Modell und die gewählten Eingangsgrössen aber eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten.

KOSTENSCHÄTZUNG

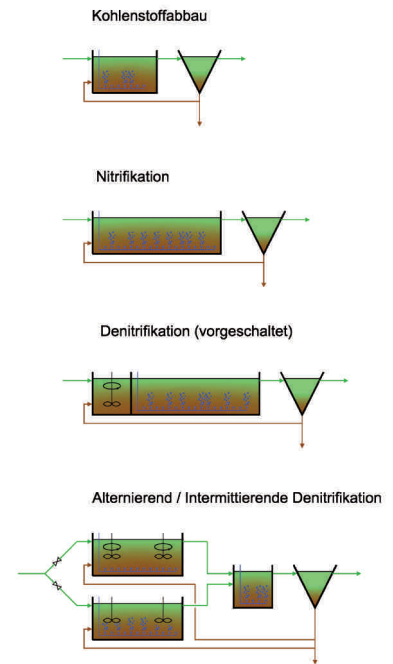
Um das Potenzial der zusätzlichen Stickstoffelimination in den schweizerischen ARA verfahrenstechnisch zu realisieren, ist das Volumen der biologischen Stufe zu erweitern und eine zusätzliche Behandlung des Faulwassers vorzusehen, wobei auch eine Kombination beider Massnahmen in Frage kommt (Fig. 6). Aufgrund seiner breiten Anwendung im Inland und der Möglichkeit zur optimierten Denitrifikation mittels A/I- oder SBR-Verfahren wurde das Belebtschlammverfahren als Grundlage zur Ermittlung der zusätzlich notwendigen Infrastruktur gewählt. Anlagen mit Biofilmverfahren sind in dieser Studie hingegen nicht Gegenstand der Betrachtung. Beim Belebtschlammverfahren mit Kohlenstoffabbau und Nitrifikation erfolgt die Elimination des Stickstoffs nur durch Einbau in die Biomasse und teilweise durch (nicht gezielte) Denitrifikation in den Nachklärbecken [23]. In klassischen Denitrifikationsanlagen wird der Nitrifikationszone ein gemischtes, unbelüftetes Becken vorgeschaltet. Bei Reinigungstechnologien mit optimierter Denitrifikation – wie beim A/I- oder SBR-Verfahren –

werden die belüfteten und unbelüfteten Phasen mit Inline-Ammoniumsonden optimal geregelt. Dadurch erzielen sie wesentlich höhere Stickstoffeliminationsraten und einen tieferen Energieverbrauch als klassische Denitrifikationsbecken [6]. Bei der Schlammbehandlung wird der Stickstoff im Faulwasser mittels einer separaten Faulwasserbehandlung entfernt – so beispielsweise mit dem Anammox-Verfahren [24, 25, 26] oder dem *Demon*[®]-Prozess [27]. Alternativ wird derzeit eine Faulwasserbehandlung mittels Stripper- und Adsorberkolonnen erprobt, welche zusätzlich die Produktion eines Stickstoffdüngers ermöglicht [28].

ERMITTLUNG DER INVESTITIONS- UND JAHRESKOSTEN

Die Verfahren zur Erhöhung der Stickstoffelimination bei der Abwasserbehandlung erfordern in der Regel den Bau von zusätzlichem Beckenvolumen. Für die Kostenschätzung hat man deshalb die Differenzkosten zur Vergrösserung der Kapazität in den Belebungsbecken berechnet (Fig. 7). Dazu wurde das heutige sowie das künftig benötigte Beckenvolumen mit den verfahrensspezifischen Belebungsbeckenvolumen bestimmt. Wie eine Auswertung des BAFU-Datensatzes zeigt, weisen kohlenstoffabbauende ARA im Mittel ein spezifisches Belebungsbeckenvolumen von 57 Liter pro EW auf und nitrifizierende Anlagen ein solches von 110 Liter pro EW. Die erhöhte Denitrifikation (> 70% Stickstoffelimination) lässt sich sowohl mit einer vorgeschalteten Denitrifikation als auch mit einem A/I- oder SBR-Verfahren erreichen. Im Gegensatz zur klassischen

VERFAHREN IN DER ABWASSERBEHANDLUNG



VERFAHREN IN DER SCHLAMMBEHANDLUNG

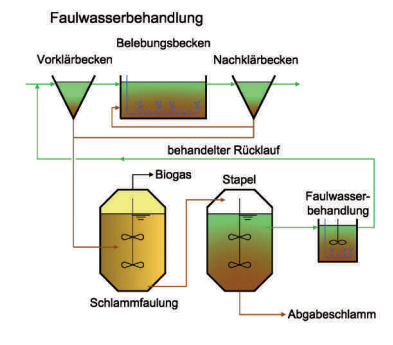


Fig. 6 Eingesetzte Verfahren in der Abwasserreinigung und zur Stickstoffelimination bei der Schlammbehandlung

Procédés d'élimination de l'azote utilisés dans l'épuration des eaux usées et lors du traitement des boues d'épuration

vorgeschalteten Denitrifikation erlauben das A/I- oder SBR-Verfahren dank ihrer kontinuierlichen Prozessmesstechnik und optimierten Regelung eine deutliche Einsparung an Beckenvolumen, um die geforderte Eliminationsleistung für Stickstoff erreichen zu können. Aufgrund der Analyse von mehreren Belebtschlammanlagen, die mit dem A/I-Verfahren funktionieren, wurde ein mittleres spezifisches Belebungsbeckenvolumen für ARA mit A/I- und SBR-Ver-

fahren (erhöhte Denitrifikation) von 140 Liter pro EW festgelegt. Für Anlagen mit vorgesehener Nachrüstung einer konventionellen vorgeschalteten Denitrifikation wählte man – basierend auf der Dimensionierung nach DWA-ATV A131 [8] und dem Bericht von Künzler + Partner [29] – einen spezifischen Belebungsbeckeninhalt von 180 Liter pro EW.

Als Grundlage für die Kostenberechnung bestimmte man für jede auszubauende ARA aufgrund des heutigen Verfahrenstyps und spezifischen Beckeninhalts die erforderliche Kapazität des Biologiebeckens. Je nach Reduktionsoption wird dann das zusätzliche Beckenvolumen für das künftige Verfahren gewählt (Fig. 7). Zur Ermittlung der spezifischen Investitionskosten pro ARA diente das benötigte Beckenvolumen für einen bestimmten Ausbaugrad. Die entsprechende Kostenkurve liess sich anhand der Zahlen ausgeführter Projekte sowie zusätzlich berechneter Stützpunkte für Belebungsbecken verschiedener Grössen erstellen. Die Investitionen zur Kalkulation der Differenzkosten umfassen nur den Bau zusätzlicher Kapazitäten an Belebungsbecken, die Erweiterung des Belüftungssystems, die Rührwerke sowie die benötigte

Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik (EMSR). Weitere Anlagenteile sind für die Bestimmung der Mehrkosten nicht erforderlich. Aus der Kostenkurve resultieren die spezifischen Investitionskosten in Funktion des Beckenvolumens. Den zu ermittelnden Mehraufwand für die Investitionen konnte man aufgrund der Anlagekosten für die heutige und künftige Beckengrösse berechnen.

Aus der Differenz des heutigen und künftigen Betriebsaufwands sowie aus den abgeleiteten Amortisationskosten ergeben sich schliesslich die Jahreskosten. Als Berechnungsbasis dienten dabei eine Abschreibungsdauer von 33 Jahren und ein Kapitalzins von 4% [30]. Die höheren Betriebskosten setzen sich einerseits aus der Differenz der Energiekosten für die Belüftung und andererseits aus dem zusätzlichen Unterhaltsaufwand zusammen.

STICKSTOFFELIMINATION BEI DER SCHLAMMBEHANDLUNG

Als verfahrenstechnische Massnahme zur Stickstoffelimination bei der Schlamm-aufbereitung verfügen heute bereits elf Anlagen in der Schweiz über eine separate Behandlung des Faulwassers. Meistens

basiert die entsprechende Stickstoffreduktion auf dem Anamnox-Prozess [24, 25] (Fig. 8 und 9). Die Auswertung der Investitionskosten verschiedener ausgeführter Projekte ergab spezifische Investitionskosten von 5000 Franken pro Kilogramm Stickstoff im Zulauf dieser Verfahrensstufe pro Tag. Darauf basierend hat man auch für diese Stufe den Investitionsaufwand berechnet.

Die bei einer Faulwasserbehandlung anfallenden Jahreskosten beinhalten die Amortisationen – bei einer Abschreibungsdauer von 20 Jahren und einem Kapitalzins von 4% – sowie den Betriebsaufwand. Er setzt sich aus den Energiekosten für die Belüftung (1 kWh/kg N nach [25]), dem Unterhalt und dem zusätzlichen Arbeitsaufwand zusammen.

IST-ZUSTAND UND ABGELEITETE REDUKTIONSOPTIONEN

Mit dem Abwasser gelangen pro Jahr etwa 41 000 t Stickstoff (t N/a) in die Schweizer ARA. Der Eintrag aus allen Kläranlagen in die Gewässer beträgt heute noch rund 23 000 t Stickstoff. Bei einem Rückhalt von insgesamt 18 000 t N/a entspricht die durchschnittliche Eliminationsleistung folglich 44%. Grosse Kläranlagen

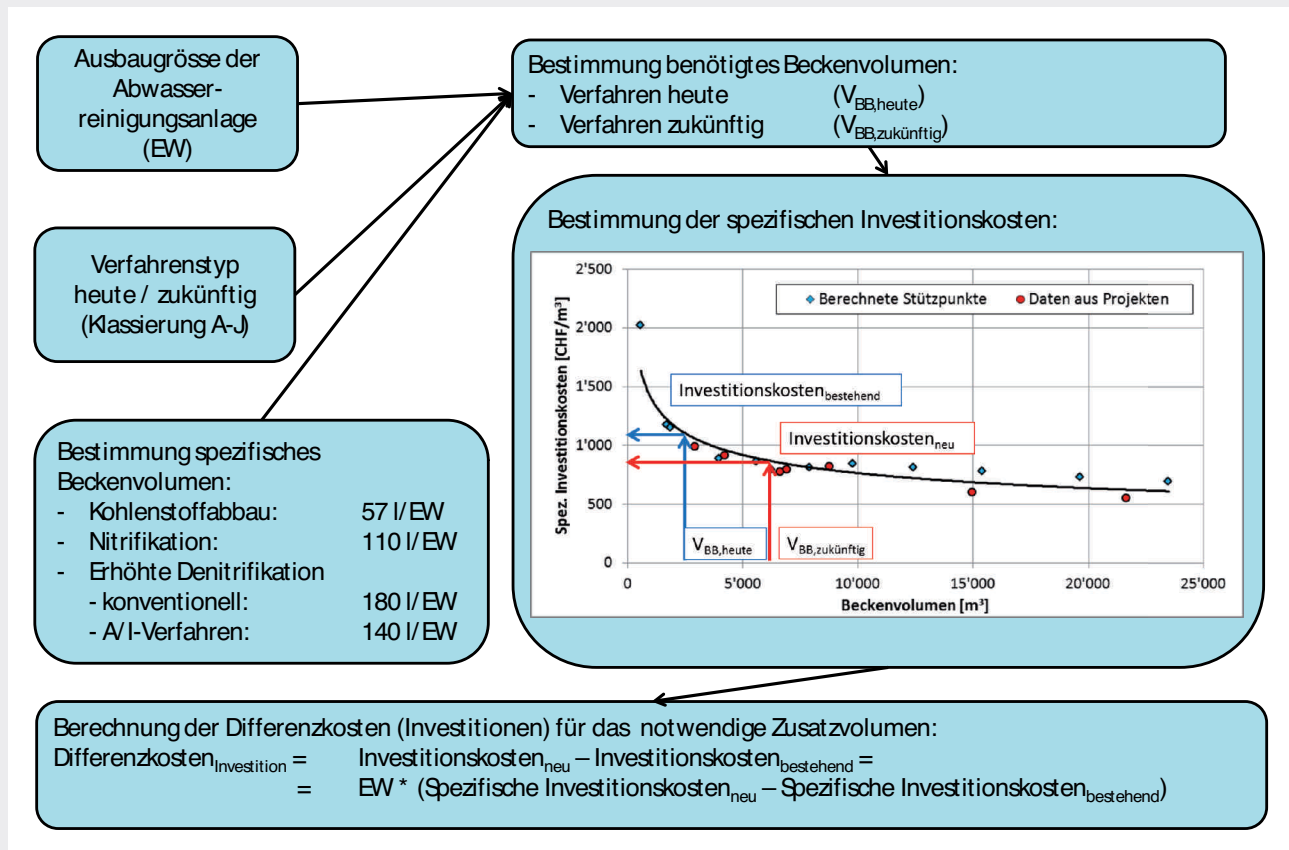


Fig. 7 Vorgehen zur Bestimmung der Investitionskosten verschiedener Optionen zur Erhöhung der Stickstoffelimination bei der Abwasserbehandlung
 Mode opératoire pour la définition des coûts d'investissement de différents scénarios pour l'augmentation de l'élimination de l'azote

(≥ 100 000 EW) entfernen den Stickstoff zu 50%, mittelgrosse (50 000 bis 100 000 EW) zu 44%, mittlere Anlagen (10 000 bis 50 000 EW) eliminieren 42% und die kleinen ARA (< 10 000 EW) 38% (Fig. 10). Die 277 ARA ≥ 10 000 EW tragen 90% zur gesamten Stickstofffracht aus Schweizer ARA bei. Da der Anteil aus Kläranlagen mit weniger als 10 000 EW vernachlässigbar klein ist, wird diese Grössenklasse bei den folgenden Potenzialberechnungen nicht berücksichtigt.

Potenzial bei ARA > 50 000 EW

In den Grössenklassen 1 und 2 (Anlagen ≥ 50 000 EW) sind 33 von 65 ARA nicht

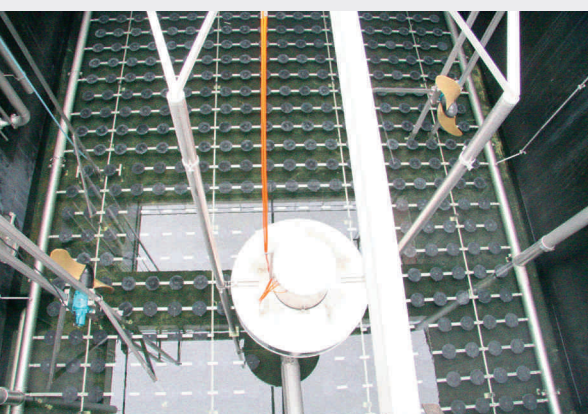


Fig. 8 und 9 Blick von der Seite und von oben in den betriebsbereiten Anammox-Reaktor der landesweit grössten ARA Zürich-Werdhölzli an der Limmat. Die anaerobe Ammonium-Oxidation zur separaten Behandlung des Faulwassers ermöglicht eine effiziente Stickstoffelimination bei der Schlammabereitung

Vue de côté et de dessus du réacteur Anammox fonctionnel de la plus grande STEP suisse, la STEP Zurich-Werdhölzli sur la Limmat. L'oxydation anaérobie de l'ammonium pour le traitement séparé des eaux putrides permet une élimination efficace de l'azote lors du traitement des boues d'épuration

(Fotos: A. Joss, Eawag; ERZ)

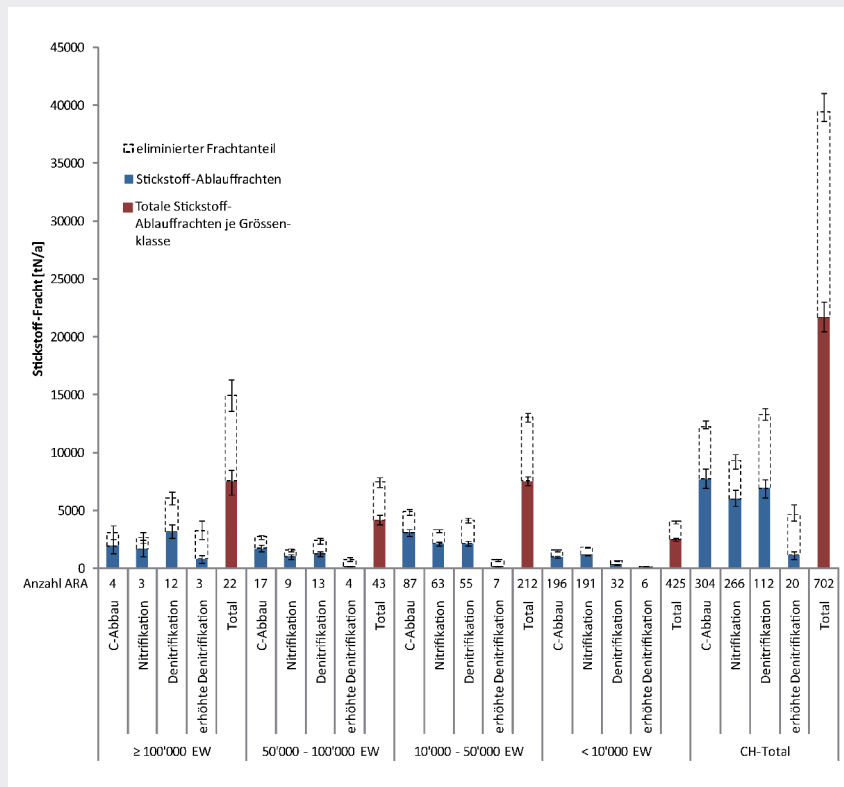


Fig. 10 Darstellung der Stickstoff-Ablaufmengen aus ARA sowie des heute eliminierten Frachtanteils (gestrichelt). Die Fehlerbalken bezeichnen die 5%- und 95%-Quantile aus der Monte-Carlo-Simulation

Représentation des charges d'azote rejetées par les STEP, ainsi que de la part de charge éliminée aujourd'hui (en pointillés). Les barres d'erreur correspondent aux quartiles 5% et 95% de la simulation Monte-Carlo

auf Denitrifikation ausgelegt. Diese Kläranlagen leiten rund 30% der gesamten Stickstofffracht in die Gewässer ein. Bei dieser Reduktionsoption wird die Auswirkung eines Ausbaus der nitrifizierenden und kohlenstoffabbauenden Anlagen zu einer erhöhten Denitrifikation untersucht – und zwar unter Annahme eines A/I-Verfahrens mit einer Stickstoffelimination von ≥ 70%.

Potenzial bei ARA 10 000 bis 50 000 EW

Von insgesamt 212 ARA in dieser Grössenklasse verfügen 87 Anlagen nur über eine Reinigungsstufe zum Kohlenstoffabbau. Sie leiten heute rund 15% der gesamten Stickstofffracht in die Gewässer ein. Bei dieser Reduktionsoption wird geprüft, welche Stickstoffmengen durch den Ausbau der 87 ARA mit einer konventionellen Denitrifikation zusätzlich entfernt werden können, wobei man eine Eliminationsleistung von ≥ 70% annimmt.

Potenzial bei denitrifizierenden ARA

Gemäss den Daten zum spezifischen Belebungsbeckenvolumen nutzen 25 der 112 denitrifizierenden Kläranlagen das vor-

handene Potenzial zur Stickstoffreduktion nicht vollumfänglich aus, weshalb sie unter der üblichen Eliminationsleistung von ≥ 70% liegen. Mit einem geringen Aufwand zur Prozessoptimierung könnten jedoch auch diese ARA den höheren Zielwert erreichen.

Potenzial bei der Faulwasserbehandlung

Mit einer optimal betriebenen Faulwasserbehandlung lässt sich eine zusätzliche Stickstofffracht eliminieren, die etwa 15% des im Rohwasser zufließenden Stickstoffs entspricht (Fig. 11). In der Schweiz betreiben aktuell 11 Kläranlagen eine Entstickung. Davon sind 7 ARA in der Grössenklasse 1 eingeteilt. Ein weiteres Reduktionspotenzial ist vorhanden, wenn die restlichen 16 Anlagen aus dieser Grössenklasse (≥ 100 000 EW) eine neue Faulwasserbehandlung realisieren.

RESULTATE UND DISKUSSION

Mit der Realisierung der vier untersuchten Reduktionsoptionen liesse sich die gesamte Stickstofffracht aus ARA von heute 23 000 t N/a um rund 6600 Tonnen auf



Fig. 11 In der ARA Glarnerland wird der Stickstoff aus der Faulwasserbehandlung in einem offenen Anammox-Reaktor abgebaut. Bei optimalen Betriebsbedingungen ermöglicht die Oxidation von Ammonium und Nitrit zu molekularem Stickstoff eine zusätzliche Eliminationsleistung, die etwa 15% des im Abwasser zufließenden Stickstoffs entspricht
Dans la STEP Glarnerland, l'azote issu du traitement des eaux putrides est éliminé dans un réacteur Anammox ouvert. Dans des conditions d'exploitation optimales, l'oxydation de l'ammonium et du nitrite pour former de l'azote moléculaire permet des performances d'élimination supplémentaires correspondant à env. 15% de l'azote arrivant avec les eaux usées
 (Fotos: A. Joss, Eawag)

16 400 t N/a reduzieren. Dies würde die durchschnittliche Eliminationsleistung der Schweizer Kläranlagen um 16% auf insgesamt 60% erhöhen. In *Tabelle 3* sind

die geschätzten Kosten für die betrachteten Reduktionsoptionen dargestellt. Die berechneten Differenzkosten basieren auf der Annahme einer kompletten Erneue-

rung der jeweiligen Anlagen. Zum besseren Verständnis der Kostenaufteilung für kohlenstoffabbauende und nitrifizierende ARA $\geq 50\,000$ EW erfolgt hier eine Differenzierung nach Potenzial 1a und 1b.

Die Differenzkosten der Investitionen bei Realisierung aller vier Reduktionsoptionen belaufen sich auf rund 344 Mio. Franken. Damit verbunden sind spezifische Jahreskosten von rund 4.10 CHF/kg N, die sich aus dem jährlichen Aufwand von 27 Mio. Franken und der zusätzlich eliminierten Stickstofffracht von 6600 t N/a ableiten lassen.

Ein Ausbau der grossen kohlenstoffabbauenden ARA in den Grössenklassen 1 und 2 zu einer erhöhten Denitrifikation ist bezüglich der spezifischen Jahreskosten effizienter als ein Ausbau solcher Anlagen der Klasse 3. Die spezifischen Jahreskosten der Option 1a liegen mit 5.00 CHF/kg N markant tiefer als beim «Potenzial ARA 10 000 bis 50 000 EW» mit 9.50 CHF/kg N. Diese berechneten spezifischen Jahreskosten sind vergleichbar mit einer Studie aus Deutschland [31], die von etwa 8 EUR/kg N ausgeht.

Bezüglich der spezifischen Jahreskosten ist ein Ausbau der Nitrifikationsanlagen in den Grössenklassen 1 und 2 – zur Erreichung einer erhöhten Denitrifikation – praktisch kostenneutral (Potenzial 1b), machen die Amortisationskosten für die Erweiterung der biologischen Stufe doch etwa gleich viel aus wie die Einsparungen

Option	Beschreibung der Optionen	Anzahl betroffene ARA	Zusätzlich eliminierte Stickstofffracht [t N/a]	Zusätzlich eliminierte Stickstofffracht [%]	Investitionskosten [Mio. CHF]	Jahreskosten [Mio. CHF/a]	Betriebskosten [Mio. CHF/a]	Spezifische Investitionskosten [(CHF*a)/kg N]	Spezifische Jahreskosten [CHF/kg N]
1	Potenzial bei ARA > 50 000 EW	32	3325	+ 8,4%	124,6	9,98	3,10	37,5	3,0
1a	Potenzial bei Kohlenstoffabbau-Anlagen > 50 000 EW	21	1905	+ 4,8%	112,6	9,47	3,26	59,1	5,0
1b	Potenzial bei Nitrifikations-Anlagen > 50 000 EW	11	1420	+ 3,6%	12,0	0,51	- 0,16	8,5	0,4
2	Potenzial bei ARA 10 000–50 000 EW	87	1532	+ 3,9%	193,6	14,52	3,85	126,4	9,5
3	Potenzial bei denitrifizierenden ARA	25	400	+ 1%					
4	Potenzial bei der Faulwasserbehandlung	16	1380	+ 3,5%	25,5	2,75	0,88	18,5	2,0
1–4	Umsetzung aller Optionen [Potenzial 1–4]	160	6637	+ 16,8%	343,7	27,25	7,83	51,8	4,1

Tab. 3 Zusammenstellung der Resultate pro Reduktionsoption: Frachtreduktion, Investitions-, Jahres- und Betriebskosten sowie die spezifischen Investitions- und Jahreskosten pro kg eliminiertem Stickstoff bei einer Kostengenauigkeit von $\pm 25\%$

Compilation des résultats par option de réduction: réduction de la charge, coûts d'investissement, annuels et d'exploitation, ainsi que coûts d'investissement et annuels spécifiques par kg d'azote éliminé pour une précision des coûts de $\pm 25\%$

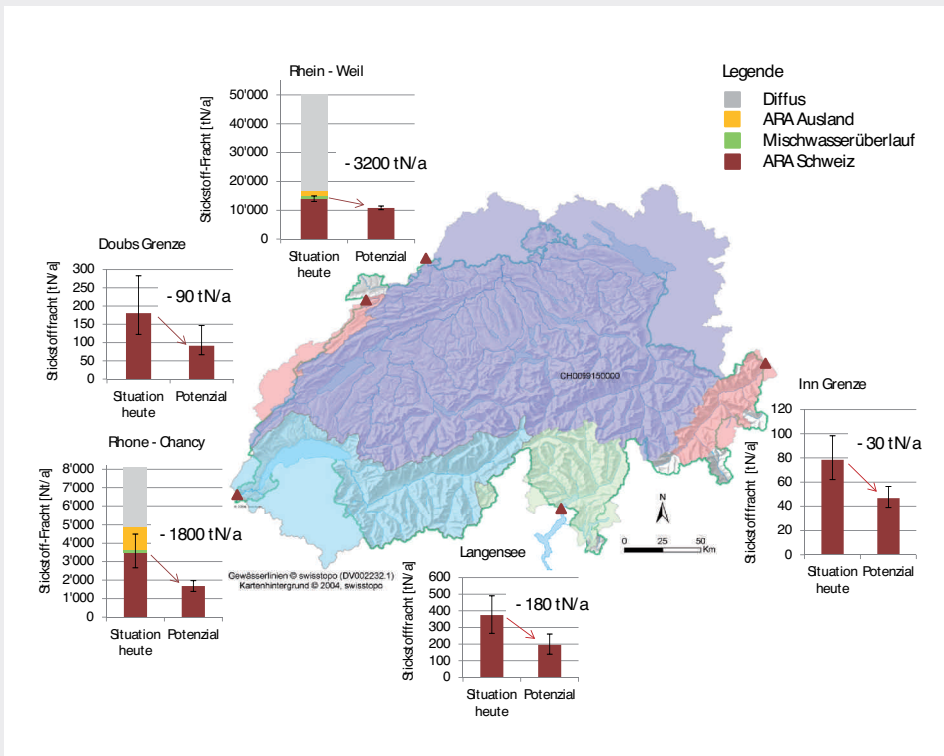


Fig. 12 Vergleich der heutigen Stickstofffracht aus inländischen ARA und der zu erwartenden Fracht bei Realisierung aller Reduktionsoptionen in den Einzugsgebieten von Rhein, Rhone, Langensee, Inn und Doubs. Für die Einzugsgebiete Rhein und Rhone ist zusätzlich der Anteil aus ARA an der gesamten Stickstofffracht dargestellt. Für die anderen Einzugsgebiete liegen keine entsprechenden Daten vor. Die Fehlerbalken bezeichnen die 5%- und 95%-Quantile aus der Monte-Carlo-Simulation

Comparaison entre la charge en azote actuelle dans les STEP nationales et la charge prévisionnelle en cas de mise en oeuvre de toutes les options de réduction dans les bassins versants du Rhin, du Rhône, du Lac Majeur, de l'Inn et du Doubs. Pour les bassins versants du Rhin et du Rhône, la part des STEP par rapport à la charge totale en azote est également représentée. Aucune donnée correspondante n'est disponible pour les autres bassins versants. Les barres d'erreur correspondent aux quartiles 5% et 95% de la simulation Monte-Carlo

Die spezifischen Jahreskosten betragen hier lediglich 2.00 CHF/kg N, wobei die daraus resultierende Stickstoffreduktion ungefähr gleich gross ist wie beim Ausbau der kohlenstoffabbauenden Anlagen der Grössenklasse 3 (Reduktionsoption 2). Allerdings liegen die spezifischen Jahreskosten der Faulwasserbehandlung deutlich tiefer.

Die Massnahmen und Kosten für das «Potenzial bei denitrifizierenden ARA» betreffen die Regelungstechnik und sind schwierig abzuschätzen. Das Frachtreduktionspotenzial einer solchen Optimierung beträgt jedoch nur rund 1%.

REDUKTIONSPOTENZIAL IN GEWÄSSEREINZUGSGEBIETEN

Figur 12 stellt das Gesamtreduktionspotenzial in den jeweiligen Flusseinzugsgebieten dar. Dabei fällt die Differenz zwischen den hier aufgezeigten Reduktionsmöglichkeiten von 5300 t N/a und dem in Tabelle 3 errechneten Potenzial von 6600 t N/a auf. Der Unterschied erklärt sich mit dem Stickstoffrückhalt der Seen, der in den aufsummierten Frachten innerhalb eines Einzugsgebiets berücksichtigt ist (Fig. 13). Für die Einzugsgebiete Rhein und Rhone sind Messdaten zur Gesamtfracht vorhanden. Im Rhein stammen heute rund 30% des Stickstoffs und in der Rhone etwa 45% aus kommunalem Abwasser. Beim Rest handelt es sich um diffuse Einträge.

Absolut betrachtet besteht das mit 3200 t N/a grösste Reduktionspotenzial im Rheineinzugsgebiet. Gemessen an der Gesamtfracht von 50 000 t N/a, welche auch diffuse Einträge einschliesst, erscheint dieses Reduktionspotenzial jedoch gering. Nimmt man den heutigen Anteil der Stickstofffrachten aus Kläranlagen an den Gesamteinträgen in die Gewässer als Massstab, so wäre ein entsprechender Ausbau der ARA in den Einzugsgebieten von Rhone, Langensee (Fig. 14), Inn und Doubs am effektivsten. In der Rhone liesse sich die gesamte Stickstoffmenge unter Berücksichtigung der diffusen Einträge von 8100 t N/a durch Massnahmen in den Kläranlagen um 20% reduzieren. Aufgrund der fehlenden Messdaten ist ein solcher Vergleich für die anderen dargestellten Einzugsgebiete nicht möglich. Die Umsetzung aller betrachteten Reduktionsoptionen könnte die ins Ausland abgeleitete Stickstofffracht aus Schweizer ARA um 30% auf rund 13 000 t N/a senken.

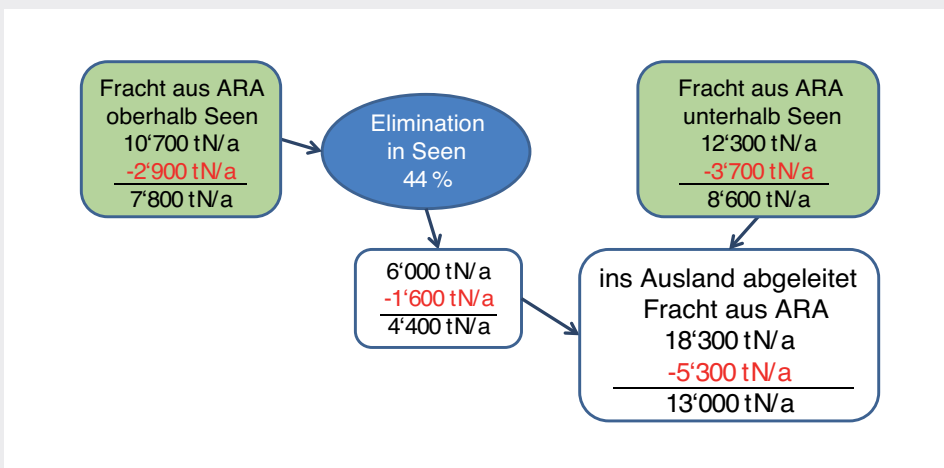


Fig. 13 Effekt der Stickstoffelimination in Seen auf die heute eingeleiteten Frachten aus ARA, auf das Reduktionspotenzial und die eingeleiteten Frachten nach Umsetzung der Reduktionsoptionen

Effet de l'élimination de l'azote dans les lacs sur les charges rejetées actuellement par les STEP, sur les possibilités de réduction et les charges rejetées après mise en oeuvre des options de réduction

beim Betriebsaufwand. Die geringeren Betriebskosten ergeben sich aus dem reduzierten Sauerstoffbedarf in der biologischen Stufe bei erhöhter Denitrifikation.

Als sehr vorteilhaft erweist sich auch eine Erweiterung der grossen ARA in der Grössenklasse 1 mit einer Verfahrensstufe zur Behandlung des Faulwassers.



Fig. 14 Die Kläranlage Focé Ticino bei Gordola verfügt zur Stickstoffelimination über eine Nitrifikation mit vorgeschalteter Denitrifikation: Bei den Stickstofffrachten aus ARA im Einzugsgebiet des Langensees besteht noch ein erhebliches Optimierungspotenzial
 La station d'épuration Focé Ticino près de Gordola dispose d'une nitrification avec dénitrification en amont pour l'élimination de l'azote: pour les charges en azote des STEP dans le bassin versant du Lac Majeur, il y a d'importantes possibilités d'amélioration
 (Foto: H. Siegrist, Eawag)

FAZIT UND AUSBLICK

Mit dem entwickelten Modell lassen sich Stickstoffeinträge aus kommunalen ARA sowie deren Verteilung in verschiedenen Einzugsgebieten zuverlässig modellieren. Sofern Dauermessstellen im Fliessgewässer bestehen, kann man die Frachten aus Kläranlagen mit anderen Emissionsquellen vergleichen. Zudem ermöglicht das Modell Berechnungen von Reduktionspotenzialen bei der Umsetzung verschiedener Massnahmen zur erhöhten Stickstoffelimination in ARA. Wie die durchgeführte Analyse zeigt, kann der Unsicherheitsbereich je nach betrachtetem Einzugsgebiet variieren. Obwohl man die Unsicherheitsbereiche relativ grosszügig gewählt hat, liegt der Fehler bei gesamtschweizerischen Aussagen nur noch bei rund 10%.

Die ARA im Rheineinzugsgebiet haben das in der GSchV (Anhang 3) festgelegte Ziel zur Stickstoffelimination erreicht. Darüber hinaus sind die Betreiber der Kläranlagen aber verpflichtet, möglichst viel Stickstoff aus dem Abwasser zu entfernen. Bei Umsetzung der betrachteten Optionen besteht ein weiteres Reduktionspotenzial von zirka 6600 t N/a. Dies würde die durchschnittliche Eliminationsleistung um rund 15% auf 60% erhöhen. Je nach Option schwanken die spezifischen

Jahreskosten dafür zwischen 40 Rappen und 9.50 Franken pro Kilogramm N. Die erreichbare, gesamtschweizerische Stickstoffelimination in ARA von etwa 60% liegt tiefer als die in der Europäischen Union für Einzugsgebiete von empfindlichen Gewässern geforderten 75%.

Es ist nicht Absicht dieser Studie, Prognosen zum zeitlichen Verlauf der Stickstofffrachtreduktion zu machen. Sie zeigt vielmehr das mit den heutigen technischen Verfahren und Prozessen mögliche Minderungspotenzial bei ausgewählten ARA auf. Mit dem ordentlichen Erneuerungsbedarf wird in den nächsten Jahren sicher ein Ausbau einzelner Anlagen stattfinden und dadurch die eingeleitete Stickstofffracht reduziert. Ob das Potenzial zur Stickstoffelimination voll ausgeschöpft wird, hängt von den politischen Rahmenbedingungen, aber auch von verschiedenen technischen Gegebenheiten ab. Dazu gehört beispielsweise die Optimierung der Biogasgewinnung aus dem Klärschlamm, da sich durch die Erhöhung der Kohlenstoffelimination in der Vorklärung auch die Denitrifikationsleistung in der biologischen Stufe reduziert. Eine wichtige Einflussgrösse ist zudem der zusätzliche Platzbedarf für weitere Verfahrensstufen zur Elimination von Mikroverunreinigungen oder für Erweiterungen von Kläranlagen als Folge des Bevölkerungswachstums.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] GSchV: Gewässerschutzverordnung vom 28. Oktober 1998, Stand am 1. August 2011. SR 814.201
- [2] BAFU und BLW (2008): Umweltziele Landwirtschaft. Hergeleitet aus bestehenden rechtlichen Grundlagen. Umwelt-Wissen Nr. 0820. Bundesamt für Umwelt, Bern, 221 S.
- [3] FIV: Verordnung des EDI über Fremd- und Inhaltsstoffe in Lebensmitteln vom 26. Juni 1995, Stand am 7. Mai 2012. SR 817.021.23
- [4] INFRAS (1996): Strategie zur Reduktion von Stickstoffemissionen, Schriftenreihe Umwelt Nr. 273, BUWAL
- [5] VSA und KI (2011): Kosten und Leistungen der Abwasserentsorgung. Fachverband Kommunale Infrastruktur, Bern und Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute, Zürich
- [6] Gorczyca, D. et al. (2008): Belebtschlammverfahren: AI versus konventioneller Betrieb – Praktische Versuche und Simulation. gwa 11/08, pp. 1–11
- [7] Ort, C. (2007): Mikroverunreinigungen. Nationales Stoffflussmodell. gwa 11/07
- [8] ATV-DVWK-A131 (2000): Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen, Mai 2000, ISBN 3-933707-41-2, GFA Hennef
- [9] European Communities (1991): Council directive of 21 May 1991 concerning urban waste water treatment. (91/271/EEC)
- [10] Stauer, P., et al. (2012): Diffuse Einträge aus Siedlungen – Ergebnisse einer Situationsanalyse. Aqua & Gas 11/12
- [11] Eawag (1992): Gewässerschutz im Einzugsgebiet des Vierwaldstättersees – Zuflussuntersuchung 1989, Studie im Auftrag der Umweltschutzämter der Kantone Luzern, Nidwalden, Obwalden, Schwyz, Uri. Auftrag Nr. 4752
- [12] Dietzel, A et al. (2012): Effects of changes in the driving forces on water quality and plankton dynamics in three Swiss lakes – long-term simulations with BELAMO. Freshwater Biology (2013) 58, 10–35
- [13] CIPEL (2006-2010): Rapports sur les études et recherches entreprises dans le bassin lémanique. Commission internationale pour la protection des eaux du Léman contre la pollution, Nyon
- [14] Bühner, H. et al. (2000): Dem Bodensee in den Ab-

VERDANKUNG

Die Autoren danken dem Bundesamt für Umwelt (BAFU) für die Finanzierung des Projekts sowie Michael Schärer und Ueli Sieber für die fachliche Begleitung. Ein besonderer Dank gilt Christian Abegglen, Patrick Fischer, Adriano Joss, Markus Koch, Sébastien Lehmann und Manfred Tschui für die konstruktiven Diskussionen in der Arbeitsgruppe und allen erwähnten Personen für ihre wertvollen Kommentare zu früheren Textversionen.

flussjahren 1996 und 1997 zugeführte Stofffrachten. Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee, Bericht Nr. 53

- [15] Mengis, M. et al. (1997): Nitrogen elimination in two deep eutrophic lakes, *Limnology and Oceanography*, Vol. 42, No. 7, pp. 1530–1543
- [16] BAFU (2011): Entwicklung der Gesamtphosphorkonzentrationen in Seen. Stand 2011. Internes Dokument
- [17] LAWA (1998): Gewässerbewertung – stehende Gewässer. Vorläufige Richtlinie für eine Erstbewertung von natürlich entstandenen Seen nach tropischen Kriterien. Herausgegeben von der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, Schwerin (D)
- [18] Saunders, D.L. et al. (2001): Denitrification rates in the sediments of Lake Memphremagog, *Water research*, Vol. 35, Issue 8, pp. 1897–1904
- [19] Mengis M. et al. (1998): Nitratelimination in Gewässern und ihre Auswirkung auf Nitratgehalte in Seen und Grundwasser. Mitteilungen aus dem Gebiete der Lebensmitteluntersuchung und Hygiene, 89, pp. 723–729
- [20] Mengis, M. et al. (1997): Stickstoff-Elimination in Schweizer Seen. *gwa* 3/97
- [21] Höhener, P. et al. (1993): Prediction of dissolved inorganic nitrogen (DIN) concentrations in deep, seasonally stratified lakes based on rates of DIN input and N removal processes, *Aquatic Sciences*, Vol. 55, Issue 2, pp. 112–131
- [22] Seitzinger, S.P. (1988): Denitrification in freshwater and coastal marine ecosystems: ecological and geochemical significance, *Limnology and Oceanography*, Vol. 33, No. 4, Part: 2, pp. 702–724
- [23] Thomann, M. et al. (1996): Denitrifikation im Nachklärbecken, *gwa*, 11/96, pp. 854–858
- [24] Fux, Ch. (2003): Biological Nitrogen Elimination of Ammonium-Rich Sludge Digester Liquids, Diss. ETH No. 15018
- [25] Joss, A. et al. (2012): Einstufige Nitrifikation/Anamox: die Prozesssteuerung, VSA-Fortbildungskurs 2012
- [26] Joss, A. (2011): Entstickung mit Anamox, VSA-Fortbildungskurs 2011
- [27] Wett, B. et al. (2008): Betriebserfahrung mit dem Demon®-Verfahren zur Deammonifikation von Prozesswasser, KA Korrespondenz Abwasser (11), pp. 245–253
- [28] Liebi, C. (2010): Stickstoffrückgewinnung und Düngerherstellung aus Faulwasser, ARA Klotten-Opfikon, Flyer: www.klaeranlage.ch
- [29] Künzler + Partner AG (1996): Stickstofffrachten aus Abwasserreinigungsanlagen, Schriftenreihe Umwelt Nr. 276, BUWAL
- [30] BG Ingenieure und Berater AG (2012): Kosten der Elimination von Mikroverunreinigungen im Abwasser, BAFU
- [31] Rouault, P. et al. (2012): Massnahmen zur Reduktion von Stickstoffeinträgen in urbane Gewässer – Wirkungen und Kosten, Tagung: Stickstofflimitation in Binnengewässern – Ist Stickstoffreduktion ökologisch sinnvoll und wirtschaftlich vertretbar? Erste Projektergebnisse des BMBF-Verbundvorhabens NITROLIMIT: www.kompetenz-wasser.de/index.php?id=363&type=0&jumpurl=fileadmin%2Fuser_upload%2Fpd%2Fveranstaltungen%2FWasserwerkstatt%2FWW32_Rouault.pdf

> SUITE DU RÉSUMÉ

tés de réduction évoquées sont d'environ 344 millions de francs pour la Suisse. S'y ajoutent des coûts d'exploitation annuels d'environ 27 millions de francs, ou convertis, de 4 francs par kilogramme d'azote éliminé.

Les calculs se basent sur un modèle de flux de substances pour l'analyse des rejets en charge dans les cours d'eau suisses, ainsi qu'un modèle de coûts qui, outre la prise en compte nationale, permet également des évaluations dans des bassins versants hydrologiques individuels de fleuves. Les possibilités de réduction ne sont pas identiques partout. Alors que la charge totale de tous les rejets d'azote dans le Rhône pourrait être réduite d'env. 20% avec des mesures prises dans les STEP, ces possibilités de réduction ne sont plus que de 6% pour le Rhin. La raison de cette différence repose sur le programme de réduction des rejets en azote dans les eaux de surface, qui a déjà été mis en œuvre dans le bassin versant du Rhin.

AquaMaster

Das kompakte Multi-Parameter Messsystem für die Wasseraufbereitung



- ✓ Trübung, pH, LF, Redox, gelöster Sauerstoff
- ✓ Anschliessen – Wasserdurchlauf einstellen – Messen!
- ✓ Kompakter Aufbau mit zentraler Bedieneinheit
- ✓ Bis 8 Messwerte können übertragen werden
- ✓ Visualisierung der Messdaten über die letzten 32 Tage
- ✓ Reinigung und Kalibrierung ohne Werkzeuge



SIGRIST
PROCESS-PHOTOMETER

SIGRIST-PHOTOMETER AG
Hofurlistrasse 1 · CH-6373 Ennetbürgen
Tel. +41 41 624 54 54 Fax +41 41 624 54 55
www.photometer.com info@photometer.com

PRÄZISE MESSEN. 