

SYMPOSIUM

Zehnte Magdeburger Abwassertage

**Europäische Anforderungen
an die Abwasserreinigung**

- **Neueste Entwicklungen der
Abwassergesetzgebung in Europa**
- **Indirekteinleiterüberwachung**
- **Steuerungskonzepte für den
Kläranlagenbetrieb**
- **Betriebsoptimierung mit Hilfe
moderner Online-Meßtechnik**

**In Zusammenarbeit mit dem
Bildungszentrum für Entsorgungs-
und Wasserwirtschaft GmbH, Essen**

**06. und 07. Oktober 1999
in Magdeburg**



DR LANGE

B·E·W·
Bildungszentrum für
die Entsorgungs- und
Wasserwirtschaft GmbH

Steuerungskonzepte für den Kläranlagenbetrieb bei Mischwasserzufluß

K. Niemann, O. Stark

1. Einleitung

Bereits bei Trockenwetter unterliegt der Kläranlagenbetrieb täglichen, wöchentlichen und saisonalen Schwankungen. Bei einem Regenereignis werden die wechselnden Betriebszustände der Kläranlage von der Dynamik des Mischwasserzuflusses überlagert. Bei Einsetzen des Mischwasserzuflusses kommt es zu einer Erhöhung des Zuflußvolumenstroms und einer Änderung der Abwasserzusammensetzung. Die Auswirkungen auf die einzelnen Reinigungsstufen sind dabei sehr unterschiedlich. Beim Belebungsverfahren werden die Nitrifikation und die Nachklärung stark beeinträchtigt. Der Zuflußvolumenstrom von Kläranlagen, die Mischwasser reinigen ist nach ATV A 131 (1991) auf den zweifachen Trockenwetterzufluß begrenzt. Um die direkte Einleitung von Mischwasser in die Gewässer zu reduzieren, findet im Kanalnetz oder vor der Kläranlage eine Zwischenspeicherung statt.

Aus wirtschaftlichen Gründen ist eine vollständige Speicherung des anfallenden Mischwassers nicht möglich. Stärkere Regenereignisse führen zu einer direkten Einleitung von Mischwasser in die Gewässer, so daß neben dem Kläranlagenabfluß weitere Schadstoffe in die Gewässer emittiert werden. Zur Reduktion der Emissionen aus dem Kanalnetz werden daher neben der Schaffung von Speichervolumen, die Kanalnetzsteuerung, die Behandlung des entlasteten Mischwassers und die Abkopplung abflußwirksamer Flächen vom Entwässerungsgebiet eingesetzt.

Eine Verminderung der Gesamtemissionen aus Mischwasserentlastung und Kläranlagenabfluß setzt die Auslastung der verfügbaren Reinigungskapazität der Kläranlage voraus, d.h. Leistungsreserven können durch eine Anpassung des Zuflußstroms an die tatsächliche Leistungsfähigkeit ausgenutzt werden.

In diesem Beitrag werden die Auswirkungen des Zuflusses von Mischwasser auf die Kläranlage dargestellt. Anschließend werden Verfahren vorgestellt, die einerseits die Ablaufkonzentrationen und -frachten reduzieren und andererseits den Zuflußstrom an die Leistungsfähigkeit der Kläranlage anpassen.

2. Auswirkungen des Mischwasserzuflusses auf die Reinigungsleistung von Kläranlagen

Die Auswirkungen des Mischwasserzuflusses werden hier – aufgrund der weiten Verbreitung – für das Belebungsverfahren mit vorgeschalteter Denitrifikation dargestellt. Bereits bei Trockenwetterbedingungen liegen bedingt durch die Schwankungen im Tagesgang unterschiedliche stoffliche Belastungen der Kläranlage vor. Im Regenwetterfall kommt es zu einer drastischen Änderung der Stoffkonzentrationen und Erhöhung des Zuflußstroms und damit auch zu stärkeren Belastungen der Kläranlage als im Trockenwetterfall. Trotz der Verdünnung durch das Regenwasser steigen die Frachten im Zulauf zur Kläranlage, wie eine Zusammenstellung von Rosenwinkel et al. (1999) ergab.

Die Charakteristik des Mischwasserzuflusses zur Kläranlage ist von den Kenngrößen des jeweiligen Entwässerungsgebietes wie Größe, Topographie und Versiegelungsgrad abhängig. Zudem beeinflussen Dauer und Intensität des Niederschlagsereignisses den Mischwasserzufluß zur Kläranlage. Trotz des sich von Ereignis zu Ereignis ändernden Verlaufs lassen sich einige generelle Aussagen über den Mischwasserzufluß zur Kläranlage machen. Nach ATV (1997) läßt sich der Mischwasserzufluß zur Kläranlage grob in drei Phasen unterteilen:

- Mischwasserzufluß bei Sammler und Speicherfüllung (Phase 1)
- Mischwasserzufluß bei gefüllten Speichern (Phase 2)
- Mischwasserzufluß bei Speicherentleerung (Phase 3).

Bild 1 zeigt wesentliche Auswirkungen des Mischwasserzuflusses auf die Reinigungsstufen einer Kläranlage.

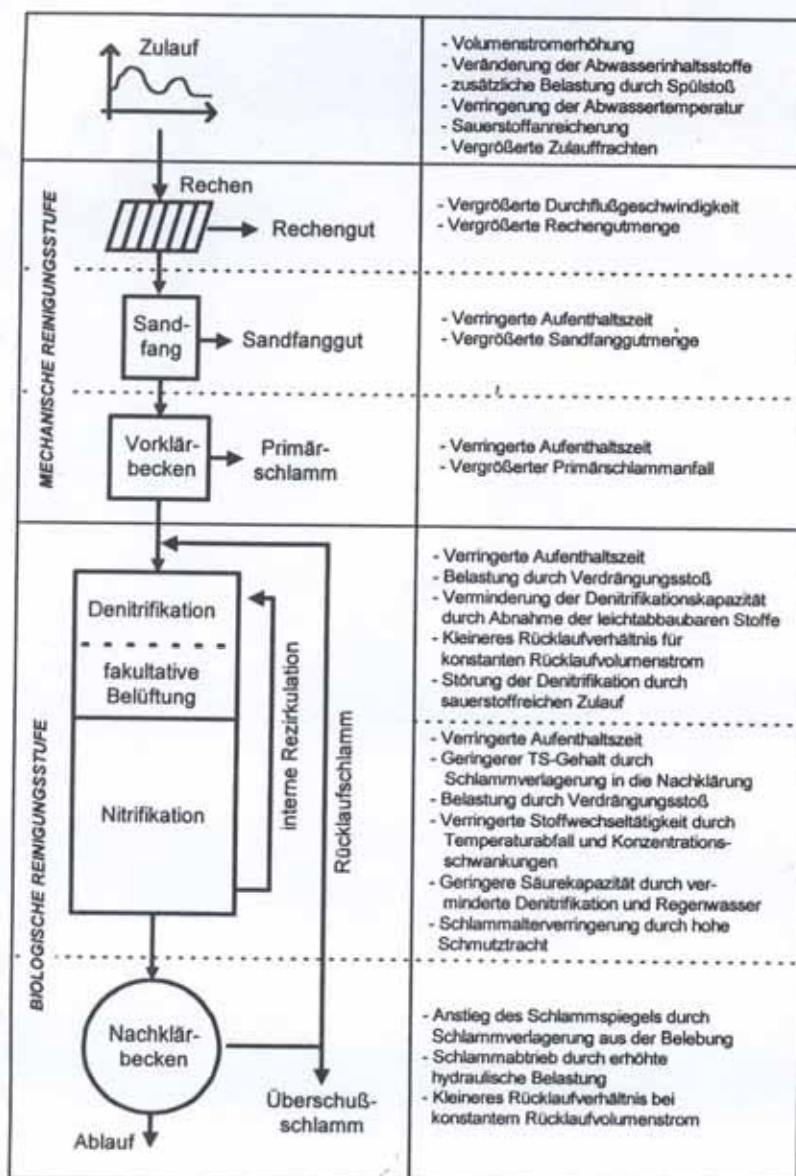


Bild 1: Mögliche Einflüsse des Mischwassers auf die verschiedenen Elemente der Kläranlage nach ATV (1997) und Kummer (1995)

Neben der Remobilisierung sedimentierter Stoffe durch den erhöhten Zuflußstrom wird bei Niederschlagsbeginn das im Kanal vorhandene Schmutzwasser durch die erhöhte Fließgeschwindigkeit schneller abgeführt. Daher kann es in Phase 1 des Mischwasserabflusses zu einem Anstieg der Stoffkonzentrationen und -frachten im Zulauf zur Kläranlage kommen. Beide Phänomene werden als Spülstoß bezeichnet. Anschließend wird die Verdünnung des Schmutzwassers durch das Regenwasser wirksam (Phase 2). Bei Entleerung der Becken (Phase 3) kann es durch Überlagerung von Trockenwetterzufluß zum Regenbecken mit dem Mischwasser im Becken zu erhöhten Frachten kommen.

Die mechanische Stufe und die Gerinne werden vor allem durch eine höhere hydraulische Belastung und die höheren Konzentrationen an partikulären Stoffen beansprucht. Unzureichende hydraulische Kapazitäten der Pumpwerke, Gerinne und Becken können durch Steuerungsmaßnahmen nicht kompensiert werden.

Von entscheidender Bedeutung bei Mischwasserzufluß sind insbesondere die Nitrifikation und die Nachklärung. Im Gegensatz zum Abbau von Kohlenstoffverbindungen wird Ammoniumstickstoff weder absorbiert noch von Mikroorganismen gespeichert. Schon im Tagesverlauf durchläuft die Nitrifikation unterschiedliche Belastungszustände. Übersteigt die der Nitrifikation zugeführte Ammoniumstickstofffracht die maximale Umsatzgeschwindigkeit im Nitrifikationsbecken, kommt es zu Konzentrationsspitzen im Ablauf, was häufig mittags oder nachmittags beobachtet werden kann. In der Phase, in der die maximale Umsatzleistung größer als die Zulauffracht ist, stehen jedoch noch nutzbare Reinigungskapazitäten zur Verfügung.

Bei Beginn des Mischwasserzuflusses trifft der erhöhte Zuflußstrom in den Sandfängen, Vorklärbecken und Denitrifikationsbecken der Kläranlage auf Schmutzwasser, das in das Nitrifikationsbecken verdrängt wird. Die hohen Konzentrationen an Ammoniumstickstoff führen in Verbindung mit dem großen Volumenstrom zu einer hohen Ammoniumstickstofffracht, die in das Nitrifikationsbecken eingetragen wird. Dies kann zur Überschreitung der geforderten Überwachungswerte für Ammonium führen.

Aufgabe der Nachklärung ist die Fest-Flüssig-Trennung und die Rückführung des Belebtschlammes in das Belebungsbecken. Die Nachklärung ist die Stufe des Belebungsverfahrens, die direkt für den Betrieb bei Mischwasserbedingungen bemessen wird, da ein Versagen zum Schlammabtrieb und so unmittelbar zum sprunghaften Anstieg der Ablaufwerte führt. Bei Beginn des Mischwasserflusses wird eine größere Schlammmenge aus dem Belebungsbecken in die Nachklärung transportiert. Neben der Bildung vermehrter Turbulenzen kommt es zur Verlagerung von Schlamm in die Nachklärung, der für Reinigungsprozesse im Belebungsbecken fehlt. Aufgrund der höheren Schlammmenge und des höheren Schlammspiegels kann es anschließend zu einer verstärkten Eindickung des Schlammes kommen. Insbesondere die Zulaufgestaltung des Nachklärbeckens, die Trockensubstanzkonzentration (TS-Gehalt) im Belebungsbecken und die Dynamik des Anstiegs des Mischwasserzuflusses haben Einfluß auf das Verhalten der Nachklärung.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß je nach vorliegenden Konzentrationen und Belastungssituation durch die Verdrängung des Schmutzwassers aus den vorgeschalteten Becken die Reinigungsleistung der Nitrifikation überschritten werden kann. Ferner kann es zur Verlagerung von Schlamm und bei Überlastung der Nachklärung zum Schlammabtrieb kommen. Der Einsatz von Steuerungsmaßnahmen soll deshalb den Verdrängungseffekt verringern und die Leistungsfähigkeit von Nitrifikation und Nachklärung steigern.

3. Steuerungskonzepte auf Kläranlagen bei Mischwasserzufluß

Auf Kläranlagen werden heute Online-Meßgeräte und Prozeßleitsysteme eingesetzt. Weitere Hilfsmittel die entwickelt wurden sind Simulationsprogramme und Methoden der Datenfernübertragung. Zudem wird in Einzelfällen bereits eine Niederschlagsvorhersage mittels Wetterradar zur Kanalnetzsteuerung herangezogen (Schaad, 1998). Durch die Verwendung von Niederschlagsprognosen werden die Möglichkeiten auf der Kläranlage präventiv zu reagieren vergrößert. Bei Verwendung eines X-Band-Radars kann mit einem Prognose-zeitraum von bis zu 2 h gerechnet werden (EG/LV, 1998). Werden die Daten mehrerer Radarstandorte kombiniert, ist der Ver-

lauf einzelner Niederschlagszellen über mehrere Stunden nachvollziehbar (Quirmbach et al., 1999), so daß sich der Prognosezeitraum weiter erhöht. Zusätzlich kann die Fließzeit vom Niederschlagsbeginn bis zur signifikanten Erhöhung des Volumensstroms im Zulauf der Kläranlage zum Prognosezeitraum addiert werden. Die Länge der Fließzeit hängt jedoch sehr stark von der Charakteristik des Entwässerungssystems ab.

Bild 2 stellt mögliche Maßnahmen dar, die gezielt zur Verringerung des Verdrängungsstosses eingesetzt werden können, so die Spitzenfracht zur Nitrifikation reduzieren, eine ausgeglichene Belastung der Nitrifikation bewirken oder die Nitrifikationskapazität vergrößern. Ferner werden Maßnahmen gezeigt, die im Bereich der Nachklärung eingesetzt zur Verminderung der Schlammverlagerung und des Schlammabtriebs verwendet werden können.

Die Untersuchungen wurden im Rahmen eines durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft geförderten Forschungsvorhabens zur Kanalnetz- und Kläranlagensteuerung durchgeführt. Für die Forschungsarbeiten wurde eine halbtechnische Versuchskläranlage in Kombination mit einem Simulationsprogramm eingesetzt. Die Versuchskläranlage arbeitet nach dem Belebungsverfahren mit vorgeschalteter Denitrifikation und wird mit Abwasser aus einem Entwässerungsgebiet im Bochumer Süden beschickt. Für weitergehende Tests der Steuerungsmaßnahmen wurde zusätzlich ein Simulationsmodell der Versuchskläranlage basierend auf dem Activated Sludge Model No. 1 (Henze et al., 1986) eingesetzt.

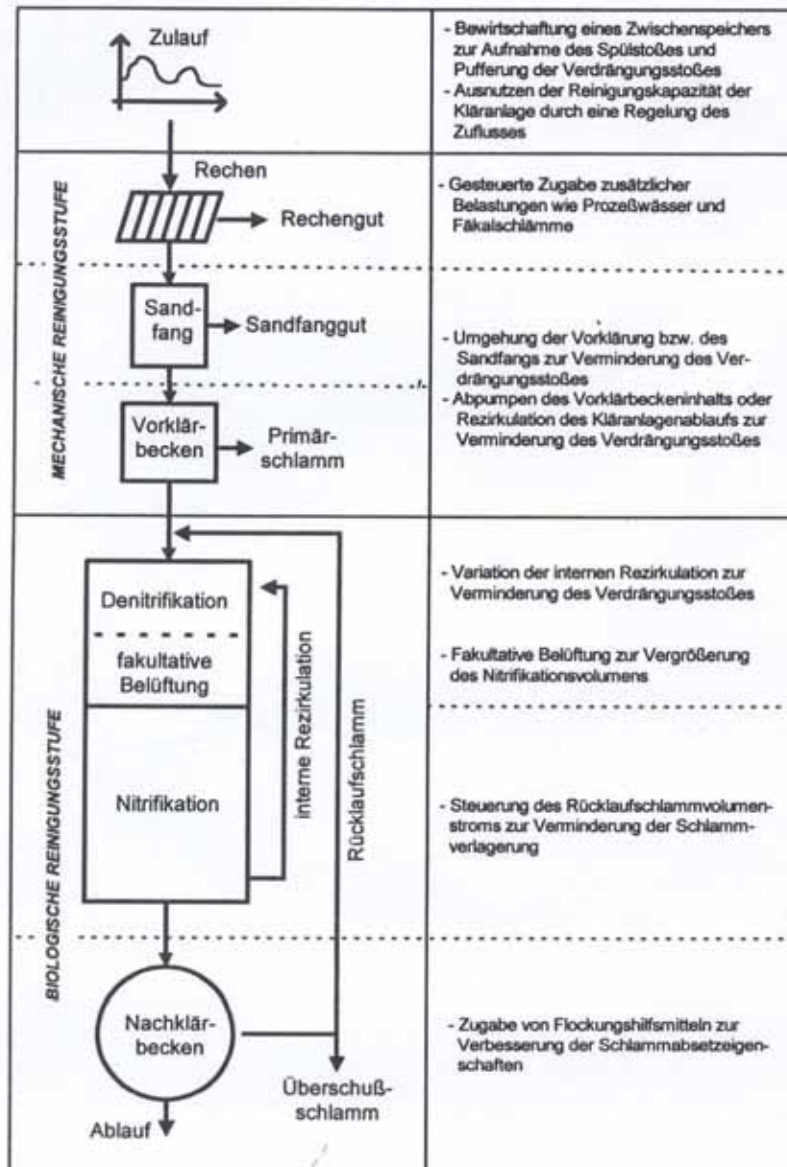


Bild 2: Mögliche präventive und betriebliche Maßnahmen zur Minderung des Mischwassereinflusses auf den Kläranlagenbetrieb

3.1 Rezirkulation des Kläranlagenablaufes

Abhängig vom aktuellen Auslastungsgrad der Kläranlage können unterschiedliche Steuerungsmaßnahmen eingesetzt werden. Stehen vor einem Niederschlagsereignis noch Nitrifikationskapazitäten zur Verfügung, kann das in der Vorklärung und den Denitrifikationsbecken befindliche Schmutzwasser durch eine Rezirkulation des Kläranlagenabflusses verdrängt werden. Als Vorwarnzeiten können die benötigte Fließzeit im Kanalnetz und der Vorhersagezeitraum eines Wetterradars angesetzt werden. Für das untersuchte Entwässerungsgebiet stehen in der Summe ca. 2 bis 3 Stunden zur Verfügung. In dieser Zeit kann durch eine Rezirkulation des Kläranlagenabflusses das in der Vorklärung oder in der Denitrifikation befindliche Schmutzwasser in Abhängigkeit vom Belastungszustand der Kläranlage behandelt werden.

3.2 Abzug von Schmutzwasser aus der Vorklärung

Neben der Verdrängung des Schmutzwassers ist das direkte Abpumpen von Schmutzwasser aus der Vorklärung und/oder dem Sandfang eine weitere Möglichkeit zur Reduzierung des Verdrängungstosses. Bei ausreichender Nitrifikationskapazität kann bereits im Vorfeld eines Mischwasserereignisses durch diese Steuerungsmaßnahme, wie hier simuliert, ein Teil des Vorklärbeckeninhalts behandelt werden. Bei diesem Verfahren wird im Gegensatz zur vorher beschriebenen Verdrängung zusätzliches Speichervolumen geschaffen. Bild 3 stellt für ein simuliertes Mischwasserereignis die Ammoniumablaufkonzentrationen mit und ohne Abzug von Schmutzwasser aus der Vorklärung dar.

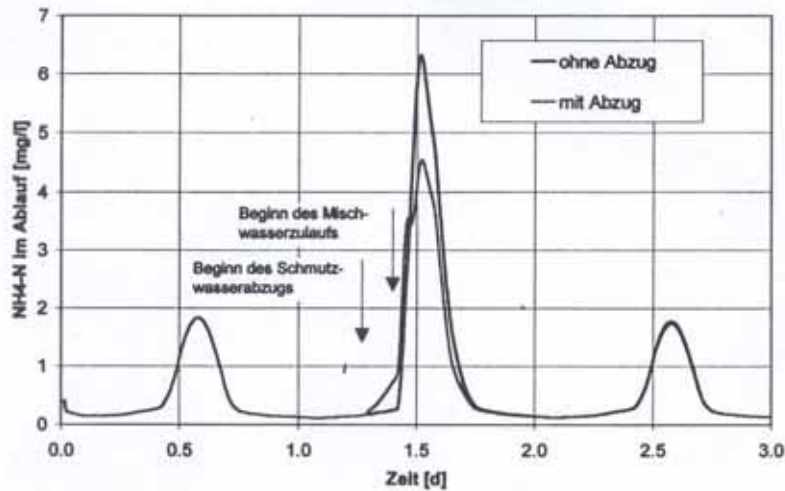


Bild 3: Simulierte Ammoniumkonzentrationen im Ablauf der Nitrifikation mit und ohne Abzug von Schmutzwasser aus der Vorklärung

Die erreichte Spitzenkonzentration konnte durch präventives Abpumpen von Schmutzwasser aus der Vorklärung um fast 30 % verringert werden. Durch diese Maßnahme wurde bereits vor Beginn des Mischwasserzuflusses, der bei 1,4 Tagen begann, eine größere Ammoniumstickstofffracht dem Nitrifikationsbecken zugeführt und präventiv behandelt. Die Frachtverlagerung führte im Betrachtungszeitraum zu einer niedrigeren Spitzenbelastung der Kläranlage und damit auch zu geringeren Ablaufkonzentrationen. Diese Maßnahme ist jedoch nur dann zielführend, wenn das Leistungspotential der Anlage noch nicht vollständig ausgeschöpft ist.

3.3 Umgehung der Vorklärung

Zur Verminderung des Verdrängungstosses bei Beginn des Mischwasserzuflusses kann die Umgehung der Vorklärung und/oder des Sandfangs eingesetzt werden. Bei Regenwetter und Unterschreitung einer Grenzkonzentration wurde hier die Vorklärung komplett umgangen. Die Grenzkonzentration an Ammoniumstickstoff im Zulauf betrug 25 mg/l. Hier könnte auch die CSB_{UV} -Konzentration (SAK-Messung) im Zulauf

zur Kläranlage verwendet werden. Die Ergebnisse für insgesamt vier Simulationen – je zwei zu unterschiedlichen Tageszeiten mit und ohne Umgehung – sind in Bild 4 dargestellt.

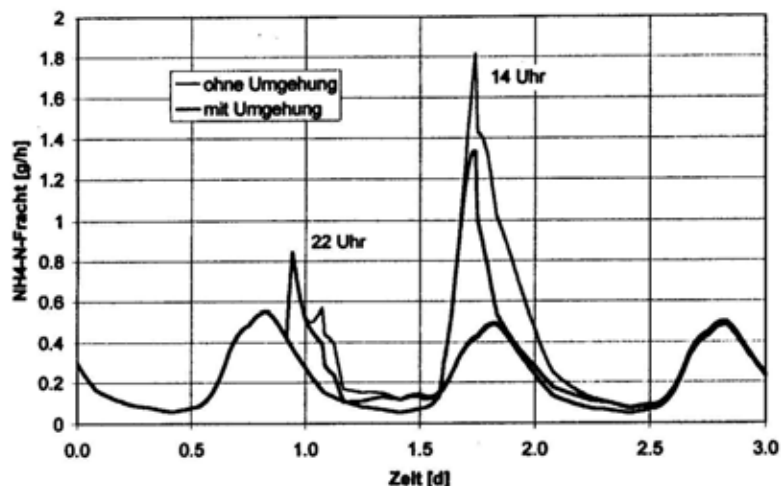


Bild 4: Simulierte Ammoniumfrachten mit und ohne Umgehung der Vorklärung zu verschiedenen Tageszeiten

Die konzentrationsabhängige Umgehung der Vorklärung führte bei dem um 14 Uhr des zweiten Tages einsetzenden Mischwasserzufluß zu einer ca. 28 %igen Verminderung der emittierten Frachten und der Spitzenkonzentration im Ablauf der Nitrifikation. Für das um 22 Uhr am Vortag einsetzende Ereignis war die Verbesserung der Ablaufwerte dagegen nur gering. Die Unterschiede sind auf die unterschiedlichen Konzentrationsdifferenzen zwischen Zu- und Ablauf der Vorklärung und unterschiedliche Ammoniumkonzentrationen in den Denitrifikationsbecken zurückzuführen. Die Ergebnisse zeigen, daß aufgrund der unterschiedlichen Belastungszustände der Kläranlage der Einsatz unterschiedlicher Steuerungsstrategien sinnvoll sein kann.

3.4 Interne Rezirkulation

Bei dem Verfahren der vorgeschalteten Denitrifikation wird durch die interne Rezirkulation Nitratstickstoff in das Denitrifikationsbecken zurückgeführt. Durch Simulationsrechnungen wurden die Auswirkungen unterschiedlicher konstanter Volumenströme der internen Rezirkulation auf die Ammoniumkonzentration im Ablauf der Nitrifikation untersucht. Die Simulationsrechnungen wurden für insgesamt 2,5 d durchgeführt. Die Ergebnisse für konstant eingestellte Rezirkulationsströme, im für den Mischwasserzufluß relevanten Ausschnitt von 0,75 bis 1,5 d, zeigt Bild 5.

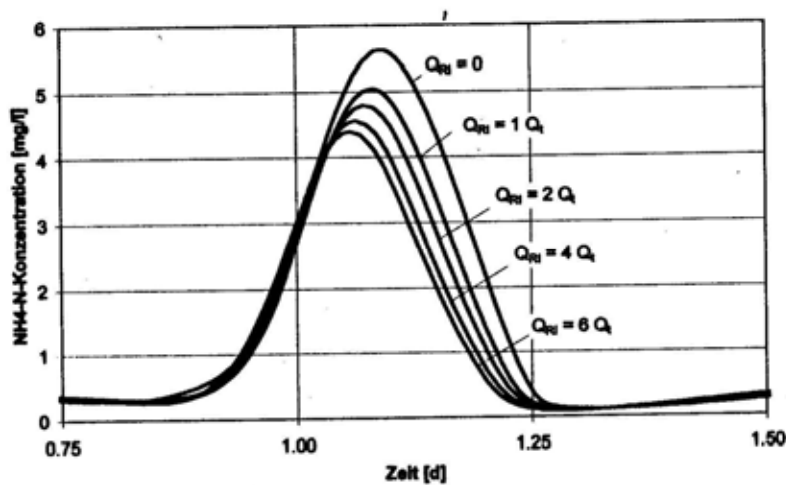


Bild 5: Simulierte Ammoniumkonzentrationen im Ablauf der Nitrifikation bei unterschiedlichen internen Rezirkulationsströmen

Die konstant eingestellten Rezirkulationsströme lagen bezogen auf Q_I zwischen 0 bis 6. Für Ammoniumstickstoff lagen die maximalen Ablaufkonzentrationen zwischen 5,6 und 4,4 mg/l. Durch die erhöhten Rezirkulationsströme kam es zu einer stärkeren Verdünnung der zufließenden Ammoniumstickstoffkonzentration. Die maximal in der Denitrifikation festgestellten Ammoniumstickstoffkonzentrationen lagen zwischen 16,2 mg/l für den Betrieb ohne Rezirkulation und 7,1 mg/l bei einem Volumenstrom der internen Rezirkulation von 6 Q_I . Aufgrund der geringeren

Anfangskonzentrationen konnte durch die Pufferwirkung der Denitrifikationsbecken die Auswirkung des Verdrängungstosses reduziert werden.

Eine weitere Verringerung der Spitzenkonzentration und der Ablauffrachten von Ammoniumstickstoff kann durch eine Steuerung der internen Rezirkulation realisiert werden. Wird bei Anstieg der Ammoniumstickstoffkonzentration der Volumenstrom der internen Rezirkulation reduziert, verringert sich die aus dem Denitrifikationsbecken in die Nitrifikation transportierte Ammoniumstickstofffracht. Bei Simulationsrechnungen wurde eine Steuerung eingesetzt, die ab einer Ammoniumstickstoffkonzentration von 2 mg/l aktiviert wurde. Die Steuerung begrenzte die über die interne Rezirkulation der Nitrifikation zugeführte Ammoniumstickstofffracht, wenn keine ausreichende Nitrifikationskapazität vorhanden war. Die Ergebnisse der Simulationen sind in Bild 6 dargestellt.

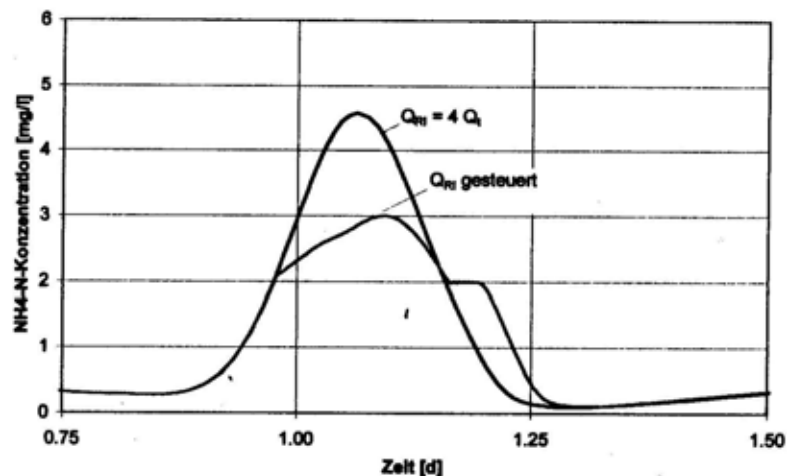


Bild 6: Simulierte Ammoniumkonzentrationen im Ablauf der Nitrifikation mit und ohne Steuerung der internen Rezirkulation

Durch Verringerung des Volumenstroms der internen Rezirkulation konnte die Spitzenkonzentration um 35 % reduziert werden. Durch Einsatz der Steuerung wurde der Volumenstrom der internen Rezirkulation zwischen 1 d und 1,2 d auf 0 m³/d

reduziert. Die anschließende Erhöhung führte ab 1,2 Tagen zu höheren Konzentrationen im Vergleich zum ungesteuerten Betrieb.

3.5 Belüftung fakultativ belüftbarer Belebungsbeckenteile

Steht im Vorfeld eines Mischwasserereignisses keine ausreichende Nitrifikationskapazität zur Verfügung, so kann durch fakultative Belüftung eines Teils der Denitrifikation des Nitrifikationsvolumen erhöht werden. Diese Maßnahme wird bereits großtechnisch erfolgreich eingesetzt (Husmann et al., 1998).

Mit Hilfe des Simulationsprogramms wurden unterschiedliche Einschaltkriterien der fakultativen Belüftung speziell für den Mischwasserbetrieb untersucht. Neben dem Referenzfall ohne Belüftung des fakultativ belüftbaren Beckenteils wurde im zweiten Fall eine Grenzkonzentration von 4 mg/l Ammoniumstickstoff im Nitrifikationsbecken als Einschaltpunkt verwendet. Im dritten Fall wurde die fakultative Belüftung aktiviert, wenn die Zulaufkonzentration zum Nitrifikationsbecken die Nitrifikationsgeschwindigkeit um den Faktor 1,25 überstieg. Die Ammoniumstickstoffkonzentrationen im Ablauf der Nitrifikation und die Belüftungsintervalle für die beiden Varianten der fakultativen Belüftung sind im Vergleich zum Simulationslauf ohne fakultative Belüftung in Bild 7 dargestellt.

Der Mischwasserzufluß begann ab 0,9 d. Die Aktivierung mittels des Konzentrationsgrenzwertes von 4 mg/l führte zu einer Verminderung der maximalen Ablaufkonzentration um etwa 18%. Das Belüftungsintervall betrug 2,9 h. Die Steuerung über einen Grenzwert bedeutet jedoch nicht, daß der Grenzwert in jedem Fall unterschritten wird. Bei weiter steigender Fracht kann es, wie gezeigt, trotzdem zu einer Überschreitung des Grenzwertes kommen.

Die maximalen Ablaufkonzentrationen wurden im Fall der frachtabhängigen Steuerung um etwa 39 % reduziert. Abhängig von einer Niederschlagsvorhersage kann bei hohen Lastzuständen der Kläranlage und einem prognostizierten Mischwasserzufluß

diese Maßnahme präventiv eingesetzt werden. Der Verdrängungsstoß kann so durch die Vergrößerung des Nitrifikationsvolumens im Vorfeld verringert werden.

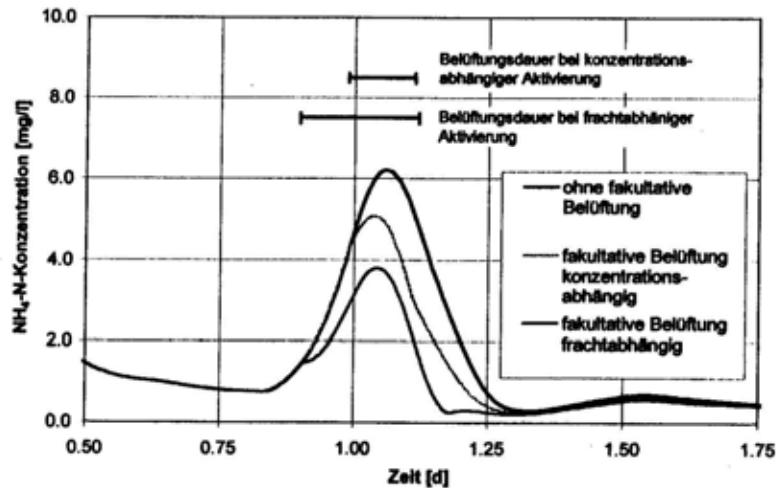


Bild 7: Simulierte Ammoniumkonzentrationen im Ablauf der Nitrifikation für unterschiedliche Einschaltkriterien der fakultativen Belüftung

Durch die fakultative Belüftung des Denitrifikationsbeckens und durch den Einsatz der internen Rezirkulation zur Verringerung der typischen Ammoniumablaufspitzen wird zwar weniger Ammoniumstickstoff an das Gewässer abgegeben, jedoch verlagert sich das angestrebte Reinigungsziel Nitrifikation und Denitrifikation zu Ungunsten der Denitrifikation. Es wird weniger Ammonium, jedoch mehr Nitrat und in der Summe ebenfalls eine größere Menge anorganischen Stickstoffs in das Gewässer eingeleitet. Eine immissionsbezogene Bewertung zwischen Ammonium und Nitrat in Abhängigkeit vom jeweiligen Gewässerzustand muß vorgenommen werden, um gegebenenfalls das Reinigungsziel der Kläranlage an die Situation bei Mischwasserbetrieb anzupassen.

3.6 Zugabe von Flockungshilfsmitteln

Die Funktionsfähigkeit der Nachklärung ist bei Mischwasserzufluß ein entscheidender Faktor. Schlammabtrieb aus der Nachklärung stellt die Reinigungsleistung der gesamten Kläranlage in Frage. Zudem ist die ausreichende Rückführung des Belebtschlammes Voraussetzung für die Effizienz der biologischen Reinigungsvorgänge.

Eine Maßnahme zur Verbesserung der Absetzeigenschaften des Belebtschlammes ist der Einsatz von Flockungshilfsmitteln (FHM) (Kayser, 1996). In Laborversuchen wurde aus einer Produktgruppe von 15 anionischen und kationischen FHM ein besonders geeignetes kationisches Polymer auf der Basis von Acrylamid ermittelt (Zetag 75 FS 40, Ciba Spezialitätenchemie), das zu einer Reduktion des ISV um fast 70 % gegenüber dem unbehandelten Schlamm führte. Die Wirksamkeit des FHMs wurde anschließend auf der Versuchskläranlage überprüft. Zur Simulation eines Mischwasserereignisses wurde hierzu auf der Versuchskläranlage die Förderleistung der Zulaufpumpe von 200 auf 600 l/h innerhalb von einer Stunde erhöht. Die Rücklaufschlammpumpe förderte durchgehend 320 l/h. Diese Einstellungen wurden bei einem Referenzversuch ohne Zugabe von FHM und bei einem zweiten Versuch mit FHM beibehalten. Die geeignete Zugabemenge war vorher durch Versuchsreihen empirisch ermittelt worden. Der Beginn der Zugabe erfolgte 30 min vor Erhöhung des Zuflußstroms und dann im Abstand von 30 min. Neben den Volumenströmen wurden die TS-Gehalte im Belebungsbecken und im Rücklaufschlamm bestimmt und über eine Bilanzierung der Feststoffe die Schlammverlagerung in die Nachklärung ermittelt. Der Verlauf der Schlammverlagerung bei präventiver Zugabe eines FHMs im Vergleich zum Referenzversuch zeigt Bild 8.

Nach annähernd gleichen Ausgangswerten wurde der Schlamm Spiegel nach Zugabe des Flockungshilfsmittels um 30 cm gesenkt. Die größere Tiefe der Klarwasserzone blieb während des gesamten Versuchsverlaufs konstant. Durch Bilanzierung der Trockensubstanz um die Nachklärung wurde festgestellt, daß die Richtung der Schlammverlagerung durch die Zugabe des Flockungshilfsmittels umgekehrt werden konnte. Nach der Zugabe von FHM wurde Belebtschlamm von der Nachklärung in

die Belebung verlagert. Im Resultat lag im Belebungsbecken eine entsprechend größere Schlammmenge vor.

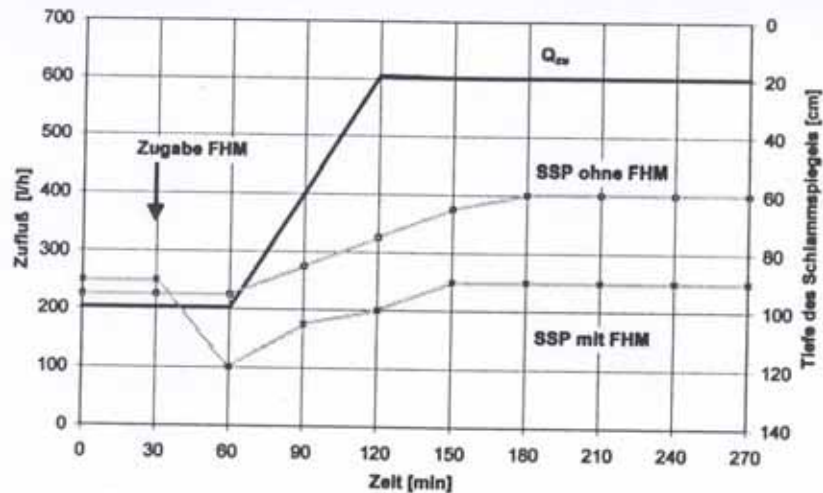


Bild 8: Lage des Schlammspiegels (SSP) mit und ohne Zugabe eines Flockungsmittels (FHM) im halbertechnischen Versuch

Weitere mögliche Dosierstrategien und die Wirtschaftlichkeit dieser Maßnahmen werden untersucht. Aus der Schlammbehandlung liegen bereits umfangreiche Erfahrungen über den Einsatz der FHM vor (ATV, 1992). Über die langfristigen Auswirkungen der FHM auf Belebungsanlagen und die Umweltverträglichkeit können jedoch noch keine abschließenden Aussagen gemacht werden.

4. Aktivierung von Leistungskapazitäten kommunaler Kläranlagen bei Mischwasserzufluß

Länge und Intensität von Niederschlagsereignissen sind zufällig verteilt. Zudem sind die Auswirkungen auf den Kläranlagenzufluß von einer Reihe weiterer Faktoren abhängig. Die Reinigungskapazität und der Auslastungsgrad der Kläranlage unterliegen täglichen aber auch jahreszeitlichen Schwankungen. Bei variierenden Anlagenkapazitäten sollte es daher das Ziel sein, den Mischwasserzufluß stärker an die

Leistungskapazität der Kläranlage anzupassen. Hierfür wurden folgende Maßnahmen untersucht:

- Statische Anpassung durch Berechnung von Q_m aus Betriebsdaten
- Regelung anhand von Leitgrößen.

4.1 Anpassung durch Berechnung von Q_m mit Betriebsdaten und Bestimmung der Anlagenkapazität

Kommunale Kläranlagen, die nach dem Belebungsverfahren arbeiten, werden für eine statische Belastung mit einer BSB_5 -Fracht, und einem maximalen Zuflußstrom bemessen. In die Bemessung gehen im Allgemeinen Zulaufmengen und Zuflußströme ein, die auf gemessenen Werten beruhen. Nach Arbeitsblatt A 131 der ATV (1991) basieren die Bemessungswerte auf den 85 % Perzentilwerten der stündlichen Zuflußströme und BSB_5 -Konzentrationen. Nach dem Gelbdruck des A 131 (1999) wird für die Ermittlung der Bemessungsdaten ein eigenes Arbeitsblatt erscheinen.

In die Dimensionierung von Kläranlagen gehen Erweiterungen des angeschlossenen Entwässerungsgebietes und Ausweisungen von Wohn- oder Gewerbeflächen ein, so daß bei neu errichteten Kläranlagen der maximale Mischwasserzufluß (Q_m) mehr als das Doppelte des aktuellen Trockenwetterzufluß (Q_t) beträgt.

Nachklärung

Ein charakteristische Betriebsgröße, die in die Bemessung eingeht, ist die Absetzeigenschaft des Belebtschlammes. Sie wird durch den Schlammindex (ISV) als Betriebsparameter angegeben. Wie sich unterschiedliche Absetzeigenschaften auf Q_m auswirken, soll anhand eines Beispiels demonstriert werden. Gewählt wurde eine Nachklärung mit einer Oberfläche $A = 1000 \text{ m}^2$ und einer Trockensubstanzkonzentration im Belebungsbecken $TS_{BB} = 3 \text{ g/l}$. Die maximale Schlammvolumenbeschickung beträgt bei horizontal durchströmten Nachklärbecken nach ATV A 131 (ATV, 1991) $q_{SV} = 450 \text{ l/(m}^2\cdot\text{h)}$, nach dem Gelbdruck des A 131 (ATV, 1999) $q_{SV} = 500 \text{ l/(m}^2\cdot\text{h)}$ und nach Bruns (1999) $q_{SV} = 600 \text{ l/(m}^2\cdot\text{h)}$. Die Oberflächenbe-

schickung wird jeweils auf $q_A = 1,6 \text{ m}^3/\text{h}$ begrenzt. Wie sich die Änderung des ISV auf den maximalen Mischwasserzufluß zur Kläranlage auswirkt zeigt Bild 9.

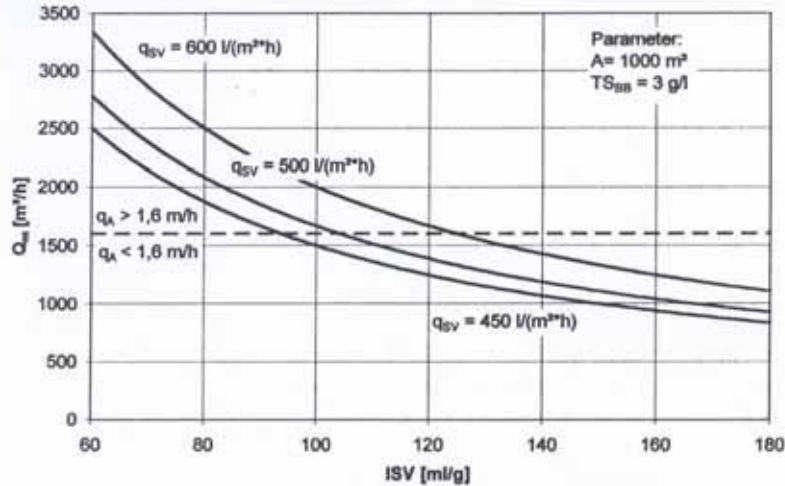


Bild 9: Maximaler Mischwasserzufluß zur Kläranlage in Abhängigkeit vom Schlammindex (ISV) für unterschiedliche Schlammvolumenbeschickungen (q_{sv})

Bei einem vorliegenden ISV von 120 ml/g kann nach dem Gelbdruck des A 131 Q_m von 1250 auf 1389 m^3/h erhöht werden. Den Werten von Bruns (1999) zufolge sogar auf 1667 m^3/h . Dies entspricht Erhöhungen von 11 bzw. 33 %, Q_m steigt – bezogen auf Q_i – auf 2,2 bzw. 2,7 Q_i .

Die obere Grenze für Q_m wird bei abnehmendem ISV durch q_A begrenzt, so daß Q_m für dieses Beispiel maximal 1600 m^3/h betragen kann. Dieser Grenzwert des ISV ist jedoch von q_{sv} abhängig und steigt mit zunehmenden q_{sv} an.

Aus den dargestellten Zusammenhängen geht weiter hervor, daß es bei einem Anstieg des ISV vom Bemessungswert 120 ml/g auf einen Betriebswert von 180 ml/g , Q_m entsprechend reduziert werden müßte. Ein weiterhin unveränderter maximaler Zuflußstrom zur Kläranlage kann so zur Überlastung der Nachklärung mit daraus resultierendem Schlammabtrieb führen.

Für einzelne Nachklärbecken können die Leistungskapazitäten, die aus konstruktiven Maßnahmen, wie Beckentiefe oder Einlaufgestaltung, resultieren durch Belastungsversuche oder eine Regelung des Zuflußstroms (siehe Kapitel 4.2) aktiviert werden.

Belebungsbecken

Durch schwankende Temperaturen im Jahresverlauf steigt bei höheren Abwassertemperaturen die Nitrifikationsgeschwindigkeit. Andererseits hängt die Leistungsfähigkeit der Nitrifikation von der Konzentration der autotrophen Organismen und ihrer aktuellen Wachstumsrate ab. Die Nitrifikantenpopulation ist u.a. abhängig von der mittleren Ammoniumfracht, mit der die Kläranlage beschickt wird. Die sich einstellende maximale Nitrifikationsgeschwindigkeit im Betrieb ist daher ein Betriebsparameter der nicht direkt aus Bemessungswerten berechnet werden kann.

Bei wechselnden Auslastungsgraden der Nitrifikation mit Hochlastbetrieb, kann über eine Bilanzierung der Frachten, die maximale Nitrifikationsgeschwindigkeit aus den Betriebsdaten berechnet werden. Sind keine Daten aus dem Hochlastbetrieb vorhanden, schlägt Bruns (1999) vor, eine Ermittlung der maximalen Nitrifikationsgeschwindigkeit betriebsbegleitend durch Batch und Fed-Batch Versuche durchzuführen.

Die maximale Nitrifikationsgeschwindigkeit kann jedoch nicht sofort in einen maximalen Zuflußstrom umgerechnet werden, da die zeitlich variable Ammoniumkonzentration im Denitrifikationsbecken und die Volumenströme der internen Rezirkulation und des Rücklaufschlammes in die Berechnung eingehen. Außerdem kann durch die Verlagerung von Belebtschlamm in die Nachklärung die Nitrifikantenkonzentration und damit die maximale spezifische Nitrifikationsgeschwindigkeit im Nitrifikationsbecken gesenkt werden. Aufgrund des dynamischen Verhaltens der Ammonium- und der Trockensubstanzkonzentrationen ist die Bestimmung von Q_m über die Leistungsfähigkeit der Nitrifikation besser durch eine dynamischen Simulation zu ermitteln.

4.2 Regelung anhand von Leitgrößen

Neben der Steuerung des Kläranlagenzuflusses über aktuelle Betriebsparameter, wie z.B. die Absetzeigenschaften und das Nitrifikationspotential, besteht die Möglichkeit durch eine Regelung eine Rückkopplung zwischen den Regelgrößen und den Stellgrößen herzustellen. Als Regelgrößen können die bei Mischwasserzufluß kritischen Größen Ammoniumkonzentration in der Nitrifikation und Höhe des Schlammspiegels in der Nachklärung verwendet werden. Zur Realisierung einer Zulaufregelung können konventionelle Regelungskonzepte, wie z.B. Drei-Punkt-Regler oder PID-Regler (Krauth und Müller, 1996; Bruns, 1999) eingesetzt werden. Eine weitere Möglichkeit stellt der Einsatz von Fuzzy-Control zur Lösung der beschriebenen Regelungsaufgabe dar. Erfahrungen mit dem Einsatz von Fuzzy-Regelungen zur Nährstoffelimination liegen bereits vor (Hansen, 1997; Husmann, 1998). Für den Einsatz von Fuzzy-Control sprechen folgende Kriterien:

- Es existiert kein für die Aufgabenstellung angemessenes Modell.
- In die Aufgabenstellung gehen Nichtlinearitäten, durch hohen Aufwand zu quantifizierende Zeitkonstanten oder mehrere Parameter ein.

Über den Entwurf, Optimierung und Inbetriebnahme einer Fuzzy-Regelung liegen bereits einschlägige Veröffentlichungen vor (Hansen, 1997), so daß die Grundlagen hier nicht ausführlich erläutert werden.

Als Eingangsgrößen des entwickelten Fuzzy-Reglers wurden die Ammoniumstickstoffkonzentration in der Nitrifikation, die Lage des Schlammspiegels in der Nachklärung und das Verhältnis der, der Nitrifikation zugeführten Ammoniumstickstofffracht, zur Nitrifikationsgeschwindigkeit eingesetzt. Ausgangsgröße ist der Zuflußstrom zur Kläranlage. Aufgrund der Betriebserfahrungen mit der halotechnischen Versuchskläranlage wurden die Wertebereiche festgelegt (niedrig, mittel und hoch). Die entsprechenden Wertebereiche der Ein- und Ausgangsgrößen wurden durch WENN-DANN-Regeln verknüpft und so die Regelbasis aufgestellt. In die Formulierung der WENN-DANN-Regeln ging das während des Versuchsbetriebs gesammelte Wissen über den Betrieb der Versuchskläranlage ein. Mit Hilfe der

verwendeten Software konnten die Regeleinstellungen Offline überprüft und der Fuzzy-Regler so optimiert werden.

Die beschriebene Fuzzy-Regelung wurde anschließend unter simulierten Mischwasserbedingungen auf der Versuchskläranlage eingesetzt. Bild 10 zeigt die Verläufe des durch den Regler aufgenommenen Zuflußstroms, der Ammoniumstickstoffkonzentration in der Nitrifikation und die Lage des Schlammspiegels als Entfernung zur Wasseroberfläche.

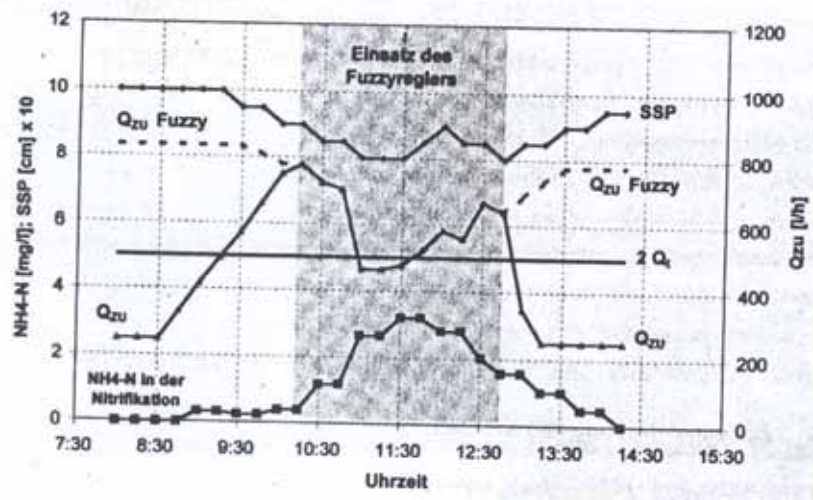


Bild 10: Regelung des Zuflußstroms (Q_{zu}) zur Versuchskläranlage und Leitparameter Schlamm Spiegel in der Nachklärung (SSP) und Ammoniumkonzentration in der Nitrifikation durch Einsatz einer Fuzzy-Regelung

Mit der Begrenzung des Zuflußstroms (Q_{zu}) setzte ab 10:00 Uhr die Fuzzy-Regelung ein und blieb bis zum Rückgang des Zuflußstroms gegen 12:45 Uhr aktiv. Die Regelung des Zuflußstroms (Q_{zu}) durch den eingesetzten Fuzzy-Regler erfolgte, wie erwähnt, mit Hilfe der Regelparameter Ammoniumstickstoffkonzentration in der Nitrifikation, des Schlammspiegels in der Nachklärung und des Verhältnisses zwischen der in die Nitrifikation eingetragenen Ammoniumstickstofffracht und der

Nitrifikationsgeschwindigkeit. Dieser Parameter wurde aufgenommen, um das Ein-fahrverhalten des Reglers zu verbessern. Liegen bei Beginn des Misch-wasserzuflusses eine große Differenz zwischen den Soll- und Istwerten vor (z.B. Sollwert 6 mg/l, Istwert 0,1 mg/l) kann es zu einem Überschwingen der Regelung durch entsprechend hohe resultierende Werte für Q_{zu} kommen. Die Aufnahme der Störgröße Ammoniumstickstofffracht zur Nitrifikation verringert daher ein Über-schwingen der Regelung bei Beginn des Mischwasserzuflusses. Aufgrund der Re-gelung wurde zu Beginn eine größere Mischwassermenge als $2 Q_i$ aufgenommen. Mit dem Anstieg der Ammoniumstickstoffkonzentrationen im Denitrifikations- und Nitrifikationsbecken und damit der Fracht zur Nitrifikation wurde der Q_{zu} auf Werte knapp unter $2 Q_i$ reduziert. Mit fallenden Ammoniumstickstoffkonzentrationen im Denitrifikations- und Nitrifikationsbecken wurde anschließend die Regelung über den Schlamm Spiegel wirksam, so daß sich kurz vor Ende des Mischwasserzuflusses Werte von 670 l/h bzw. 640 l/h für Q_{zu} einstellten. Durch den Einsatz der Regelung konnte gerade an den entscheidenden Phasen zu Beginn und am Ende des Misch-wasserzuflusses ein höheres Q_{zu} von der Versuchskläranlage aufgenommen werden.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Wie gezeigt, können im Bereich der Nitrifikation durch die vorgestellten Steuerungsmaßnahmen die Auswirkungen des Verdrängungsstosses reduziert wer-den. Durch Aktivierung der fakultativen Belüftung wird die Nitrifikationskapazität erhöht. So können die Emissionen der Kläranlage bei Mischwasserzfluß reduziert werden. Teilweise wurden diese Maßnahmen präventiv eingesetzt, d.h. vor dem Mischwasserzufluß aktiviert. Hierfür ist entweder eine Niederschlagsprognose durch Weterradar, eine Erfassung des Niederschlagsgeschehens über Niederschlags-schreiber oder eine Überwachung der Fließzustände im Kanalnetz notwendig. Ferner ist die Wirksamkeit der Maßnahmen, wie am Beispiel der Umfahrung der Vorklärung gezeigt, vom Betriebszustand der Anlage und der Charakteristik des Mischwasserzuflusses abhängig.

Durch die Zugabe von Flockungshilfsmitteln konnten die Absetzeigenschaften des Schlammes verbessert werden. Ziel dieser Maßnahme war es letztendlich die Aufnahmekapazität der Nachklärung und damit der gesamten Anlage zu erhöhen. Für die Steuerungsmaßnahmen die hier nicht beschrieben wurden, liegen Informationen in der Literatur vor. Prozeßwasser oder Fäkalschlamm sollten nicht während einer Hochlastphase, wie zu Beginn des Mischwasserzuflusses, zugegeben werden (Schmidt, 1997). Kayser (1996) schlägt vor, den Rücklaufschlammstrom verzögert nach zwei bis drei Stunden an den ansteigenden Mischwasserzufluß anzupassen. Ferner kann durch entsprechende Steuer- und Regelalgorithmen für die Phosphatfällung die Phosphorelimination sichergestellt werden. Gegenwärtig wird an Entscheidungsmodellen zum kombinierten Einsatz der Steuerungsmaßnahmen gearbeitet.

Für die Anpassung des Mischwasserzuflusses an die Leistungsfähigkeit der Kläranlage wurde für die Nachklärung eine statische Anpassung mit Betriebswerten vorgestellt. Einen weiteren Schritt ist die Regelung des Mischwasserzuflusses anhand von Leitparametern. Hierdurch konnte die Anlage leistungsabhängig beschickt werden. Die Regelung kann in Kombination mit der Steuerung der Mischwasserbehandlung, z.B. des letzten Regenbeckens vor der Kläranlage (Bruns, 1999), eingesetzt werden.

Neben dieser auf dezentralen Regelungen basierenden Vorgehensweise, wurden im Bereich des Kanalnetzes Steuerungen realisiert (EG/LV, 1998), die ausgehend von aktuellen Betriebs- und Wetterdaten Simulationsrechnungen für das Niederschlagsverhalten, den Niederschlagsabfluß und die Schmutzfrachten im Kanalnetz vorab durchführen. Durch die Einbeziehung der Kläranlage sollen Belastungssituationen im voraus bestimmt und Steuerungsmaßnahmen durch eine integrierte Steuerung von Kanalnetz und Kläranlage koordiniert werden, um so eine Reduktion der Gesamtemissionen aus Kanalnetz und Kläranlage zu erreichen.