

**Betrieb einer neuen SBR-Kläranlage unter
Berücksichtigung der Ergebnisse integrierter
Ansätze mittels dynamischer Simulations-
modelle für Kanalnetz und Kläranlage
– am Beispiel der Zentralkläranlage Spenge –**

Kurzfassung

finanziell gefördert durch das
**Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und
Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen**
und die
Stadt Spenge
als Antragsteller

Projektträger

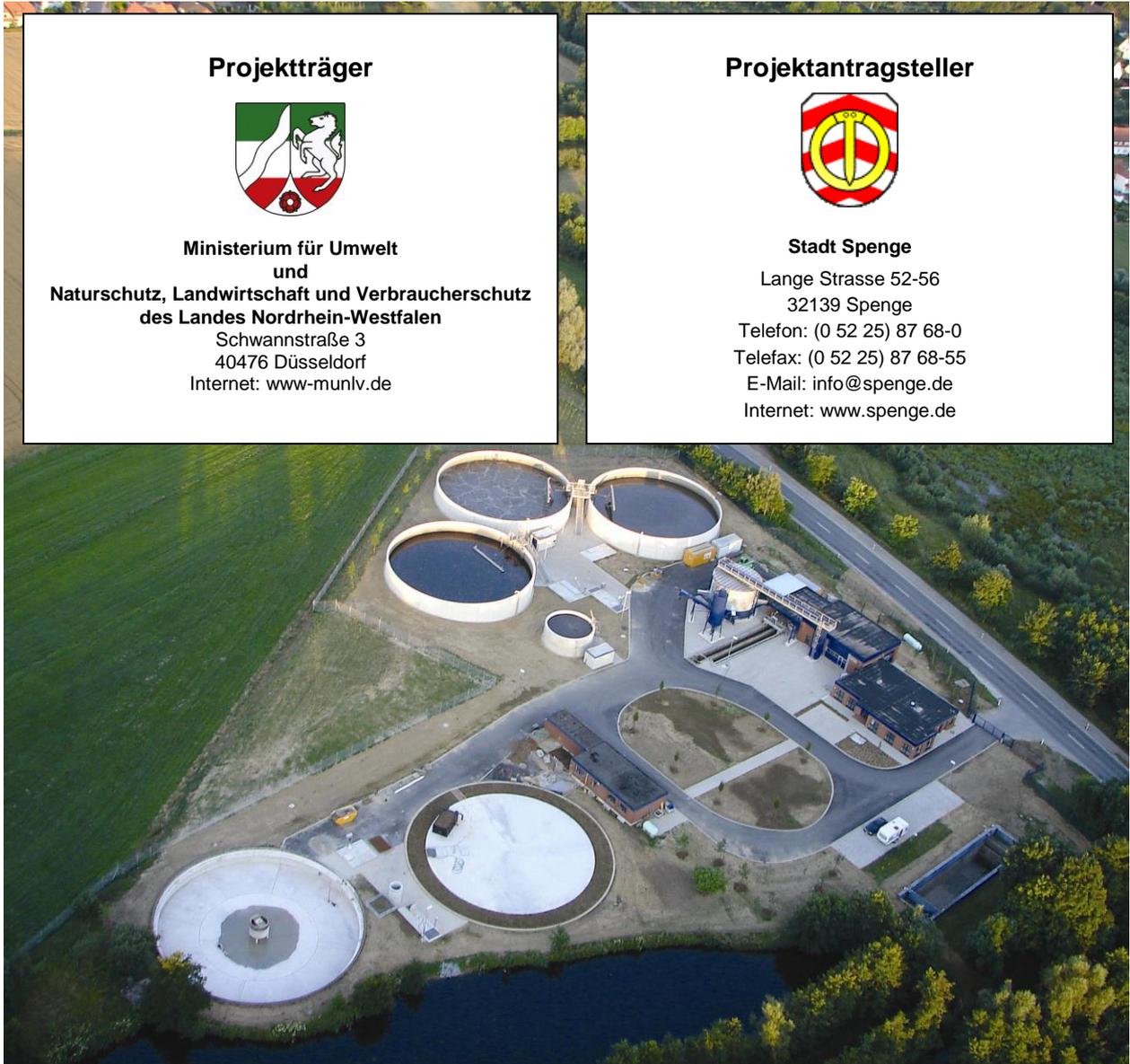


**Ministerium für Umwelt
und
Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
des Landes Nordrhein-Westfalen**
Schwannstraße 3
40476 Düsseldorf
Internet: www-munlv.de

Projektantragsteller



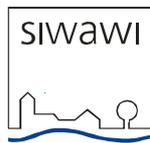
Stadt Spenge
Lange Strasse 52-56
32139 Spenge
Telefon: (0 52 25) 87 68-0
Telefax: (0 52 25) 87 68-55
E-Mail: info@spenge.de
Internet: www.spenge.de



Projektbeteiligte



LimnoTec Abwasseranlagen GmbH
Eickhorster Strasse 3
32479 Hille
Telefon: (0 57 03) 51 03-0
Telefax: (0 57 03) 51 03-33
E-Mail: info@limnotec.de
Internet: www.limnotec.de



**Technische Universität Kaiserslautern
Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft
und Zentrum für Innovative
AbWassertechnologien**
Paul-Ehrlich-Straße 14
67663 Kaiserslautern
Telefon: (0631) 250 - 3685
Telefax: : (0631) 250 - 3905
E-Mail: gevatter@rhrk.uni-kl.de
Internet: www.siwawi.arubi.uni-kl.de



**Bockermann Fritze
IngenieurConsult**
Dieselstraße 11
32130 Enger
Telefon: (0 52 24) 97 37-0
Telefax: (0 52 24) 97 37-50
E-Mail: mail@bockermann-fritze.de
Internet: www.bockermann-fritze.de

Ansprechpartner der Projektbeteiligten



LimnoTec Abwasseranlagen GmbH

Dr. rer. nat. Niels Holm

Dr. rer. nat. Sabine Rönner-Holm

Dipl.-Ing. Herbert Teinert

Technische Universität Kaiserslautern



Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft und

Zentrum für Innovative AbWassertechnologien



Prof. Dr.-Ing. Theo G. Schmitt

Prof. Dr.-Ing. Heidrun Steinmetz

Dipl.-Ing. mgr inż. Bartosz Slizewski

Dipl.-Ing. Inka Kaufmann Alves



Dipl.-Ing. Ralf Fritze

Dipl.-Ing. Juliane Röthemeyer

Dipl.-Ing. Hans-Joachim Anton

Für die Unterstützung während des Projektes danken wir der



Stadt Spenge mit

Jens Nickolaus

Heiko Holtmann

Thomas Klein

Jan Magnus

Stefan Müller

Jens Höhne

Bernd Denhelt

Inhaltsverzeichnis

Problemstellung	3
Vorgehensweise	3
Projektgebiet Spenge	4
Datenerhebung und Intensivmesskampagnen	7
Simulationsmodelle	10
Simulationsstudien und Strategien	15
Großtechnische Umsetzung	23
Fazit und Ausblick	25

Tabellen und Abbildungen

Tabelle 1:	Kalibrierparameterdatensätze für die ZKA Spenge	14
Tabelle 2:	Gesamtfrachten für Szenario 5-2, Abwassertemperatur = 18 °C	23
Tabelle 3:	Optimierungspotential für die ZKA Spenge bezogen auf die Jahresmittelwerte aus dem Acron	24
Tabelle 4:	Optimierungspotential für die ZKA Spenge bezogen auf die Eliminationsraten und Betriebskosten	25
Abbildung 1:	Übersicht Einzugsgebiet der ZKA Spenge mit Kanalisationsnetz	4
Abbildung 2:	Lageplan der ZKA Spenge	5
Abbildung 3:	DIC-SBR-Verfahren	6
Abbildung 4:	Beispiel der Fremdwasserganglinie der Stadt Spenge mittels Methode des gleitenden Minimums im Jahr 2005.	7
Abbildung 5:	Beispiel von aus Sondenwerten errechneten Konzentrationsganglinien im Vergleich zu analytischen Messwerten	8
Abbildung 6:	Zulaufbedingungen bei unterschiedlichen Wetterverhältnissen (RW=Regenwetter, TW=Trockenwetter, Bemessungswert 22.500 EW)	9
Abbildung 7:	2h-Zulaufmengen im Beschickungspumpwerk bei Trockenwetter, das höhere Niveau am 02.12.05 entsteht durch Schmelzwasserbedingungen	10
Abbildung 8:	Beispiel zur hydraulischen Anpassung Schmutzfrachtmodell (Regenereignis am 15.09.2005) an einer Messtelle	11
Abbildung 9:	Beispiel stoffliche Anpassung Schmutzfrachtmodell (Regenereignis am 04.07.2007) im Kläranlagenzufluss	11
Abbildung 10:	Vergleich der gemessenen Onlinewerte des SBR2 mit den Simulationsdaten (a) unter Verwendung des Kalibrierparameterdatensatzes 1 in der Messkampagne 1 im	

	Kalibrierungsreaktormodell und (b) unter Verwendung des Kalibrierparameterdatensatz 2 in der Messkampagne 6 im Gesamtmodell.....	13
Abbildung 11:	Prozentuale Veränderung der Entlastungskennwerte bei Erhöhung der Drosselabflüsse	16
Abbildung 12:	Kläranlagenzuflüsse und CSB-Konzentrationen (Szenario 6-1-06.02.1977).....	16
Abbildung 13:	Vergleich (a) der maximalen Ablaufwerte und (b) der Betriebskosten bei unterschiedlichen Typushöhengängen.....	18
Abbildung 14:	Auswirkung aller Optimierungsmaßnahmen auf die maximalen Ablaufwerte bei einem Hochlasttag der Messkampagne 1, 4h-Zyklus, 18 °C 19	
Abbildung 15:	Vergleich der maximalen Ablaufwerte bei unterschiedlichen Einstellungen in kürzere Zeitzyklen	20
Abbildung 16:	Vergleich der maximalen Ablaufwerte (a) und Betriebskosten (b) ohne und mit Sprung zurück in längere Zeitzyklen nach Ende eines Regenereignisses	21
Abbildung 17:	Ermittlung des optimalen Kläranlagenzuflusses für Spenge.....	22

Problemstellung

Da in den letzten Jahren die Zahl der in Deutschland und auch in anderen Ländern befindlichen sequential batch reactor (SBR)-Anlagen stark angestiegen ist und die SBR-Technologie auch zunehmend bei größeren Kläranlagen Anwendung findet, ist es besonders wichtig, integrierte Ansätze für SBR-Kläranlagen mit Mischkanalisationen systematisch zu analysieren.

Ausgangspunkt des Forschungsvorhabens war die anstehende Sanierung und Erweiterung der Zentralkläranlage (ZKA) Spenge. Die ZKA der Stadt Spenge wurde auf 22.500 EW erweitert. Dabei wurde die bestehende Tropfkörperanlage durch ein neues Beschickungspumpwerk, drei neue SB-Reaktoren und zwei Pufferbehälter ersetzt.

Ziel des vorliegenden Projektes war es, durch einen integrierten Betrieb und Optimierung der einzelnen Anlagenteile und Systemkomponenten der SBR-Kläranlage und des Kanalnetzes in Spenge die Emissionen aus dem Gesamtsystem zu minimieren und einen stabilen und kostengünstigen Betrieb der Kläranlage Spenge zu erreichen. Dabei sollten insbesondere die Auswirkungen unterschiedlicher Betriebsweisen der beiden Pufferbehälter auf der Kläranlage untersucht werden. Das große Puffervolumen in Kombination mit dem differential internal cycle strategy (DIC)-SBR-Verfahren ermöglicht dabei die Untersuchungen von Strategien, bei denen Fracht und Hydraulik relativ stark entkoppelt werden können.

Vorgehensweise

Als Werkzeug zur Optimierung des Betriebs von Kläranlage und Kanalnetz besitzt die integrierte, dynamische Simulation mit Hilfe von international anerkannten Modellen eine große Bedeutung. Mit simulationstechnischer Nachbildung der Gegebenheiten wird vermieden, dass es im Rahmen von Versuchen in der Großtechnik zu Gewässerbeeinträchtigungen kommen kann. Darüber hinaus sind mit der Durchführung halb- oder großtechnischer Versuche erhebliche Kosten verbunden. Mittels Simulationsstudien ist es möglich, dass Regelstrategien kostengünstig und ohne Gefahr für das Gewässer zunächst am Computer entwickelt und getestet werden. Daher sollte die ZKA Spenge zusammen mit dem Kanalnetz in diesem Forschungsvorhaben mit Hilfe der integrierten, dynamischen Simulation untersucht werden.

Gemäß dem standardisierten und international anerkannten Protokoll zur dynamischen Simulation von Kläranlagen wurde nach Definition der Zielsetzung eine umfangreiche Datenerhebung vom Kanalnetz und von der Kläranlage durchgeführt sowie alle gesammelten Daten überprüft und verarbeitet. Mit Hilfe von Intensivmesskampagnen wurden dann die charakteristischen Niederschlags- und Abflusseigenschaften im Kanalnetz sowie die Charakteristika der Zuläufe, der internen Vorgänge im Belebtschlamm und der Abläufe auf der Kläranlage ermittelt. Basierend auf allen erhobenen Daten wurden die Simulationsmodelle erstellt. Die Intensivmesskampagnen wurden zur Definition von charakteristischen Abflüssen im Kanalnetz und Zuläufen auf der Kläranlage herangezogen, um einerseits die Modelle zu kalibrieren und andererseits um für die anschließenden Studien geeignete Bedingungen zu schaffen. In den Studien wurden dann gezielt vorher festgelegte Regel- und Steuerstrategien im Modell untersucht. Nach Abschluss der Studien wurden alle geeigneten Optimierungsmaßnahmen Schritt für Schritt auf der Kläranlage eingeführt, deren Wirkung über einen längeren Zeitraum überprüft und mit den Ergebnissen der Modellierung verglichen.

Projektgebiet Spenge

Das Einzugsgebiet der Kläranlage besteht aus den Ortsteilen Bardüttingdorf, Wallenbrück, Mantershagen, Teile von Westerenger der Stadt Enger, Lenzinghausen und Spenge Stadtmitte. Die Einwohnerzahl wird für die Gemeindeteile mit rund 16.000 angegeben.

Das Kanalnetz der Stadt Spenge entwässert eine Fläche von $A_{E,b} = 140$ ha, wovon die Nachbarstadt Enger mit dem Ortsteil Westerenger einen Anteil von 17,1 % annimmt (s. auch Abbildung 1). Das ausgedehnte Einzugsgebiet besteht aus z.T. ländlich geprägten Wohngebieten unterschiedlicher Siedlungsdichte und kleineren Gewerbegebieten. Das Kanalnetz besteht zu 72 % aus Mischwasserkanälen und besitzt 13 Sonderbauwerke, die in vier verschiedene Gewässer entlasten. Zur Mischwasserbehandlung steht im Einzugsgebiet der Kläranlage Spenge insgesamt ein Volumen von rund 6.000 m^3 zu Verfügung (ohne nachgeschaltete Regenrückhalteräume). Das spezifische Speichervolumen ergibt sich hieraus zu über $48 \text{ m}^3/\text{ha}$ $A_{E,b}$, was einen vergleichsweise hohen Wert darstellt.

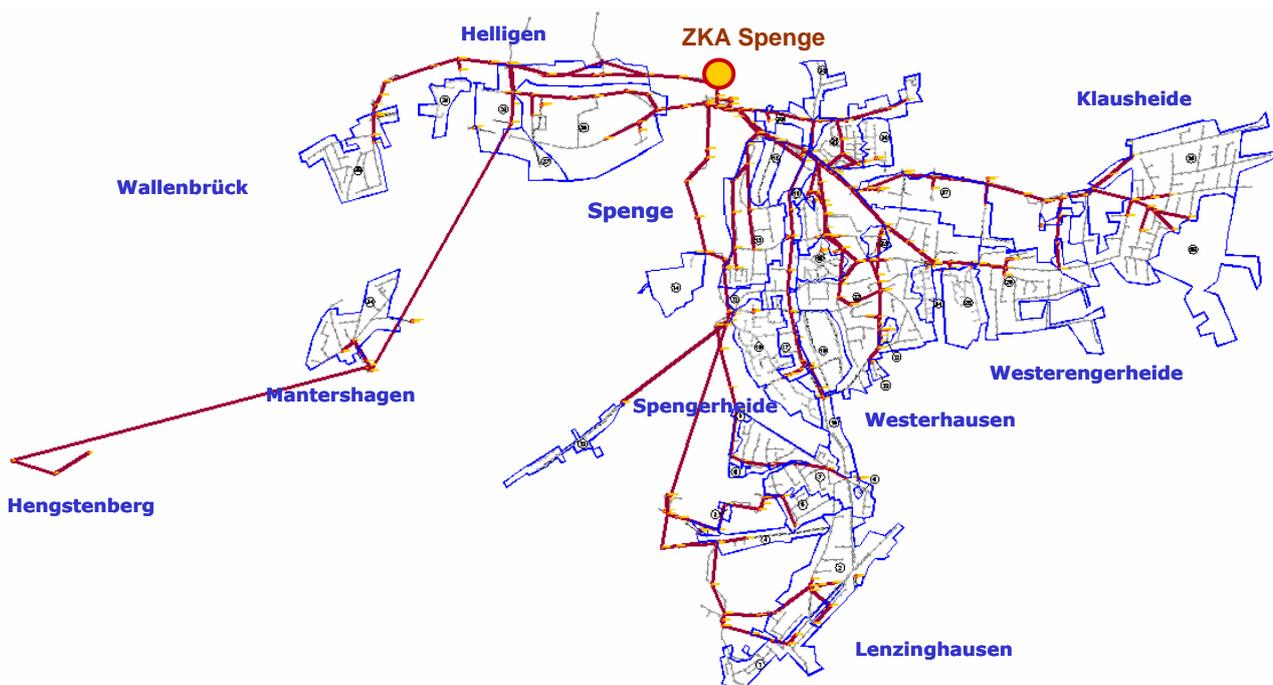


Abbildung 1: Übersicht Einzugsgebiet der ZKA Spenge mit Kanalisationsnetz

Der Bemessungszufluss zur Kläranlage Spenge beträgt derzeit $Q_M = 200 \text{ l/s}$, was einem Auslastungswert $f_{S,QM}$ von 8,4 entspricht. Dieser Wert liegt bereits deutlich über dem in ATV-DVWK-A 198 empfohlen Bereich von etwa 4 bis 7,5 für Mittelstädte in der Größe von Spenge. Die Kläranlage wurde für eine Durchsatzkapazität von 250 l/s ausgebaut und könnte rein hydraulisch als Spitzenbelastung sogar einen kurzzeitigen Zufluss von 300 l/s abarbeiten. Diese mögliche Höherbeschickung würde einem Faktor $f_{S,QM}$ von mehr als 13 entsprechen. Die genannten

Zuflüsse werden in den folgenden Untersuchungen als unterschiedliche Beschickungsstufen angesetzt.

Die ZKA Spenge (Abbildung 2) weist durch den Umbau der beiden Zwischen- und Nachklärbecken zu Pufferbehältern eine optimale Ausgangssituation für eine flexible und bedarfsgerechte Verknüpfung der Steuerung und Regelung von Kanalnetz und Kläranlage auf. Aufgrund der implementierten, flexiblen Steuer- und Regeltechnik der ZKA Spenge sind viele Varianten der Betriebsführung möglich. Dies bildet die Voraussetzung zur Einführung geeigneter, mit Hilfe der Simulation erfasster Optimierungsmaßnahmen.

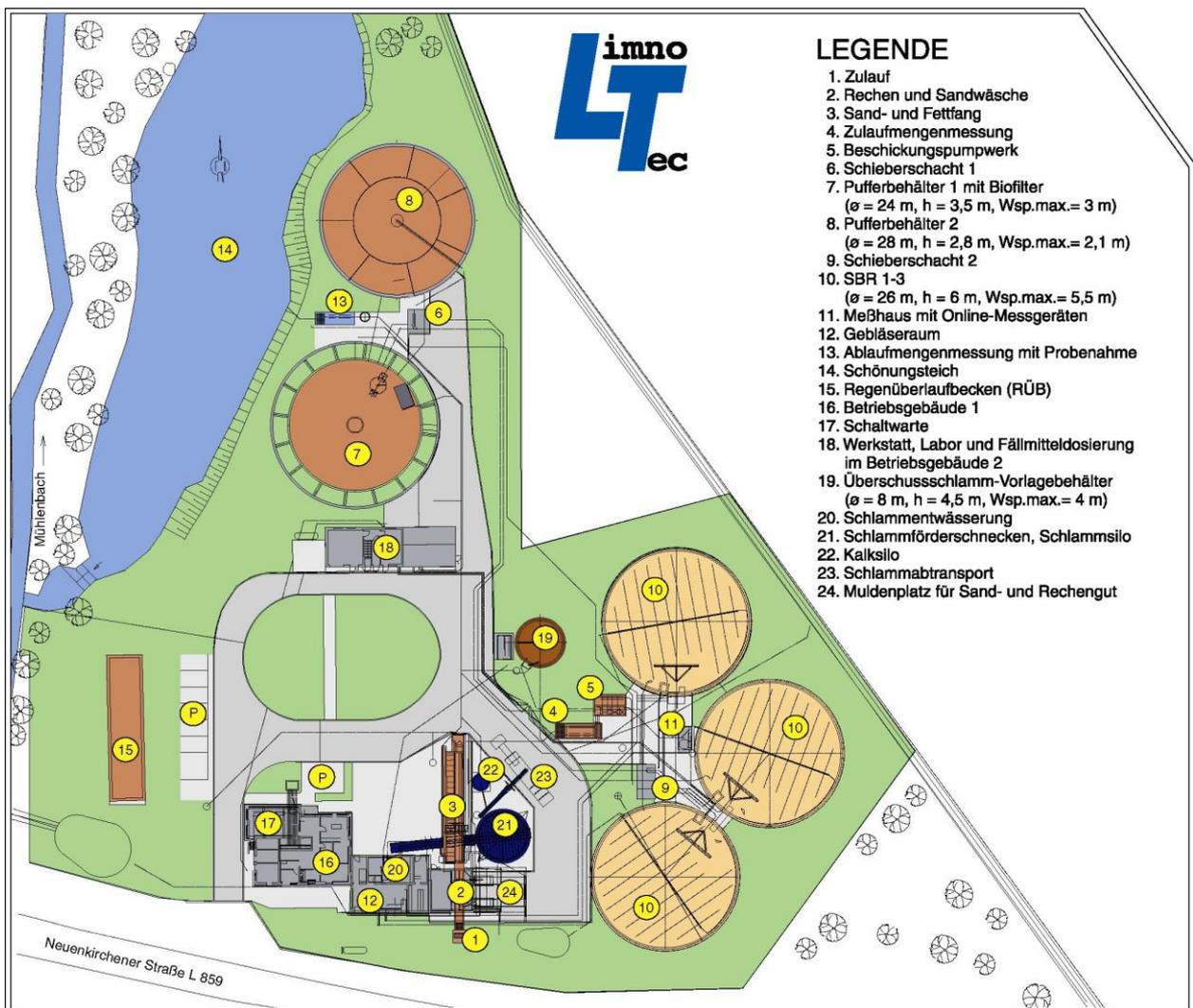


Abbildung 2: Lageplan der ZKA Spenge

Dem Abwasserweg folgend gelangt der Zulauf der ZKA Spenge nach der mechanischen Reinigung in das Beschickungspumpwerk; von hier wird es in bestimmten Zeitzyklen nacheinander auf die drei SB-Reaktoren verteilt (Abbildung 2). Werden die Reaktoren nicht beschickt, wird der Zulauf bei Trockenwetter in den Pufferbehälter 1 und bei Regenwetter zusätzlich in den Pufferbehälter 2 gepumpt. Bei der nächsten Beschickung eines Reaktors gelangt ein Teil des

zwischengespeicherten Zulaufs aus den Pufferbehältern im Freigefälle zurück ins Beschickungspumpwerk und wird zusätzlich zur Beschickung des Reaktors genutzt.

Die eigentliche Reinigung des Abwassers erfolgt in den SB-Reaktoren je nach Zuflussmenge in unterschiedlich langen Zeitzyklen durch den Belebtschlamm. Nach der Beschickung mit Abwasser wechseln sich während eines Zeitzyklusses anoxische, anaerobe und durch die Belüftung hervorgerufene aerobe Phasen ab. In diesen Phasen wird der Belebtschlamm gerührt. Während der anoxischen Phase kommt es zur Denitrifikation. Bei der anaeroben Phase wird Phosphor zurückgelöst. In der aeroben Phase erfolgen die Nitrifikation und die Phosphoraufnahme. Am Ende eines Zyklusses wird der Rührer ausgestellt und der Belebtschlamm sedimentiert. Der klare Überstand wird mit Hilfe von Dekantern als gereinigtes Abwasser in die Vorflut geleitet. Danach beginnt ein neuer Zyklus.

Beim speziellen DIC-SBR-Verfahren (Abbildung 3) gibt es zwei interne Zyklen mit jeweils einer Beschickung und den unterschiedlichen Phasen. Bei der ersten internen Beschickung wird der nicht durchmischte Überstand des Pufferbehälters 1 in den Reaktor hinzudosiert, dadurch ergibt sich ein niedriges C/N-Verhältnis. Bei der 2. internen Beschickung wird der volldurchmischte Inhalt vom Pufferbehälter 1 in den Reaktor gepumpt und ergibt ein hohes C/N-Verhältnis. Dieses Verfahren begünstigt zusätzlich stabil niedrige Ablaufwerte.

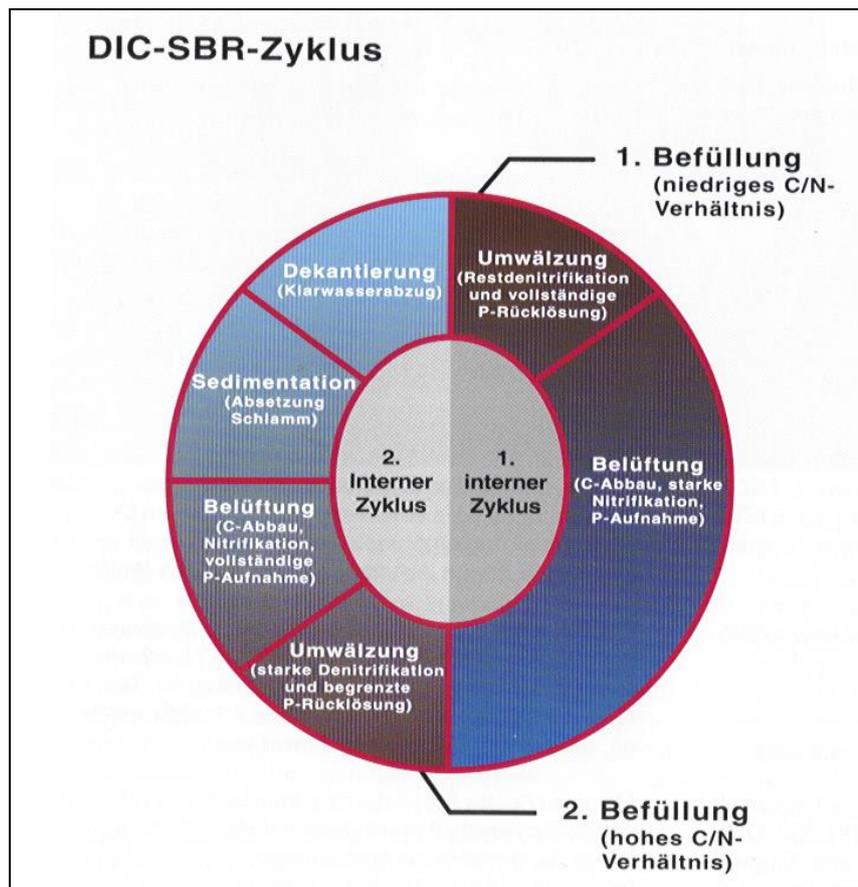


Abbildung 3: DIC-SBR-Verfahren

Beim return sludge (RS)-Verfahren wird zusätzlich der Belebtschlamm aus den Reaktoren in den Pufferbehälter 1 gepumpt. Dadurch wird dieser Behälter als vorgeschaltetes Denitrifikationsbecken und zur Verbesserung der Bio-P-Elimination genutzt, wodurch geringere Nitrat- und Phosphorablaufwerte resultieren.

Diese beiden Verfahren haben bei Simulationen von anderen DIC/RS-SBR-Anlagen im ASM1 großes Optimierungspotential aufgezeigt, die je nach Zulauf- und Belebtschlammigenschaften der Kläranlage zu unterschiedlichen Ergebnissen führten. Daher wurden diese beiden Verfahren bei den Simulationsstudien der ZKA Spenge mit Verwendung des ASM3-EAWAG-BioP-Modells eingehend analysiert.

Datenerhebung und Intensivmesskampagnen

Kanalnetz

Während der Datenerhebung wurden die Einzugsgebiets- und Kanalnetzdaten erfasst. Die im Rahmen des Projektes durchgeführten umfangreichen Niederschlags-Abfluss- und Qualitätsmessungen haben einen enormen Beitrag zum Systemverständnis in der Kanalisation der Kläranlage Spenge geliefert.

Erste Einschätzungen über das Betriebsverhalten von Entlastungsbauwerken in der Kanalisation konnten bereits durch die bauwerksspezifische Ermittlung von spezifischem Volumen und dem Faktor $f_{S,QM}$ im Drosselabfluss der Bauwerke gewonnen werden. Eine solche Auswertung zeigt häufig – wie auch in Spenge –, dass die Drosselabflüsse der verschiedenen Regenentlastungsbauwerke nicht „homogen“ an den Kläranlagenzufluss angepasst sind.

Durch Abflussmessungen in der Kanalisation bei Trockenwetter konnte neben der Größe des Trockenwetterabflusses auch typische Tagesgänge bei Trockenwetter erfasst werden. Außerdem dienen die Messungen zur Ermittlung des Fremdwasseranfalls (vgl. Abbildung 4).

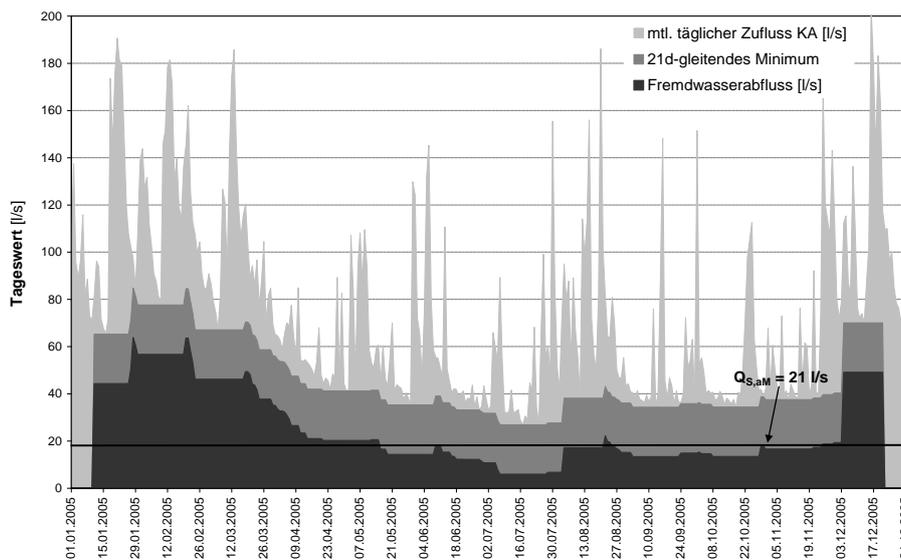


Abbildung 4: Beispiel der Fremdwasserganglinie der Stadt Spenge mittels Methode des gleitenden Minimums im Jahr 2005.

Der Fremdwasseranteil im Zufluss zur Kläranlage wurde im Mittel der Jahre 2003 bis 2005 mit 50 % ermittelt. Entgegen der Vermutungen in der Antragsphase des Projektes konnte im Jahresmittel – zumindest für die ausgewerteten Jahre – also ein hoher, aber kein ungewöhnlich hoher Fremdwasserzufluss festgestellt werden. Ein großer Unterschied zwischen Winter- und Sommermonaten konnte bestätigt werden. Um die örtliche Variabilität des Fremdwasseraufkommens feststellen zu können, müssten länger andauernde zeitlich parallele Messungen in den verschiedenen Zuflussstrangen zur Kläranlage durchgeführt werden.

Die Niederschlags- und Abflussmessdaten bei Regenwetter konnten zunächst genutzt werden, um die Drosselung an einigen Bauwerken zu überprüfen und ggf. auf den Soll-Abfluss zu korrigieren. Aber auch die Abflussbereitschaft der angeschlossenen befestigten Flächen konnte für die spätere Modellanwendung abgeschätzt werden.

In Spenge konnte zusätzlich noch auf zahlreiche Messdaten – i.d.R. Füllstandsmessungen – von einigen Regenüberlaufbecken zugegriffen werden, die sogar schon im PLS der Kläranlage erfasst werden. Allerdings werden solche Betriebsdaten oft nicht kontinuierlich systematisch ausgewertet. Sie liefern erste wichtige Erkenntnisse über die Art der Betriebsweise der Bauwerke und geben Aufschlüsse über die Auslastung.

Durch umfangreiche Qualitätsmessungen konnten Erkenntnisse über Verschmutzungen im Gesamtabfluss und einem Zuflussstrang zur Kläranlage bei Trocken- und Regenwetter gesammelt werden. Diese Messung im Zufluss zur Kläranlage – also an der Schnittstelle zwischen Kanalnetz und SBR-Kläranlage – wurden auch zur stofflichen Verifizierung des Schmutzfrachtmodells herangezogen. Die weiteren Qualitätsmessungen innerhalb des Kanalnetzes lieferten vertiefte Erkenntnisse zur Dynamik bei Mischwasserabfluss. Der Einsatz von Online-Messsonden im Kanalnetz hat sich zwar als sehr schwierig herausgestellt, es konnten aber dennoch hoch aufgelöste Konzentrationsverläufe im Kanalnetz über lange Dauer generiert werden (s. Abbildung 5).

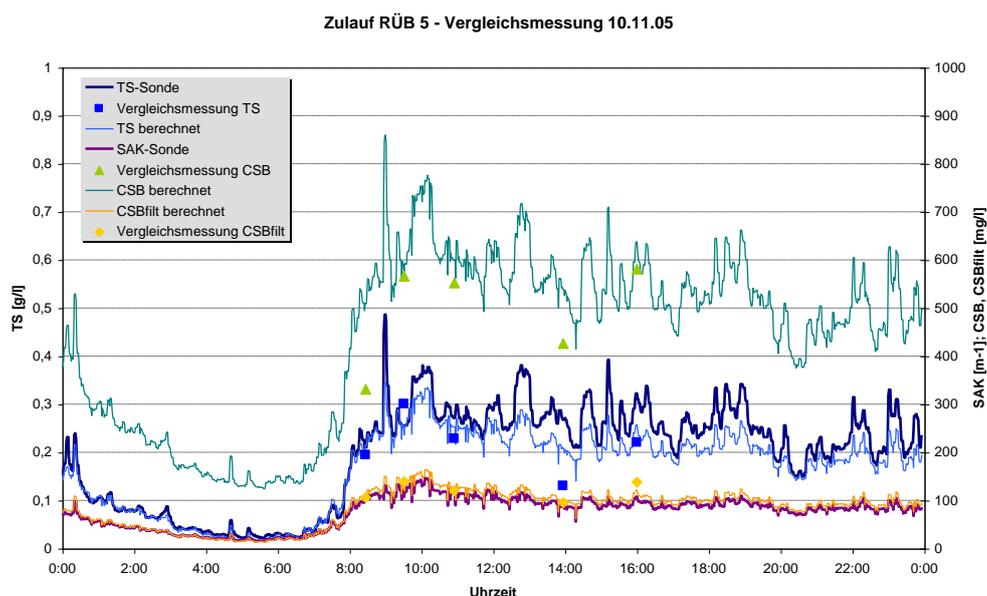


Abbildung 5: Beispiel von aus Sondenwerten errechneten Konzentrationsganglinien im Vergleich zu analytischen Messwerten

Insgesamt können solche Online-Messungen im Kanalisationsnetz nur unter sehr hohem Wartungsaufwand durchgeführt werden. Außerdem sind zahlreiche stichprobenhafte Vergleichsmessungen zur Korrelation der gemessenen Sondenwerte (SAK, TS) mit Abwasserparametern erforderlich. In Überläufen von Entlastungsbauwerken sind Messungen mit Online-Sonden weitaus zuverlässiger möglich, dies war in Spenge aufgrund erschwelter Einbaubedingungen allerdings nicht möglich.

Kläranlage

In der technischen Dokumentation der Bedienungs- und Wartungsanleitung und den Lageplänen, die beide von der Firma LimnoTec Abwasseranlagen GmbH erstellt wurden, konnten alle Daten über sämtliche Behälter- und Aggregateigenschaften entnommen und zusammengefasst werden, die zur Erstellung der Modelle notwendig waren.

Bei den sechs durchgeführten Intensivmesskampagnen wurden zwei Messkampagnen mit Messungen im Zulauf der Anlage, im Zulauf zu dem Leitreaktor, in dem Leitreaktor und den Abläufen durchgeführt und für die Kalibrierung und Validierung des Kläranlagenmodells genutzt. Jeweils zwei Messkampagnen dienten der Ermittlung von Trockenwetter- und Regenwettereigenschaften im Zulauf. Diese Daten wurden zur Fraktionierung von geeigneten Zuläufen für das Kläranlagenmodell verwendet.

In der Abbildung 6 wird deutlich, dass die mittleren Tageszulaufwerte gerade bei Regenwetterbedingungen mit vorher länger anhaltenden Trockenperioden über dem Bemessungswert von 22.500 EW liegen.

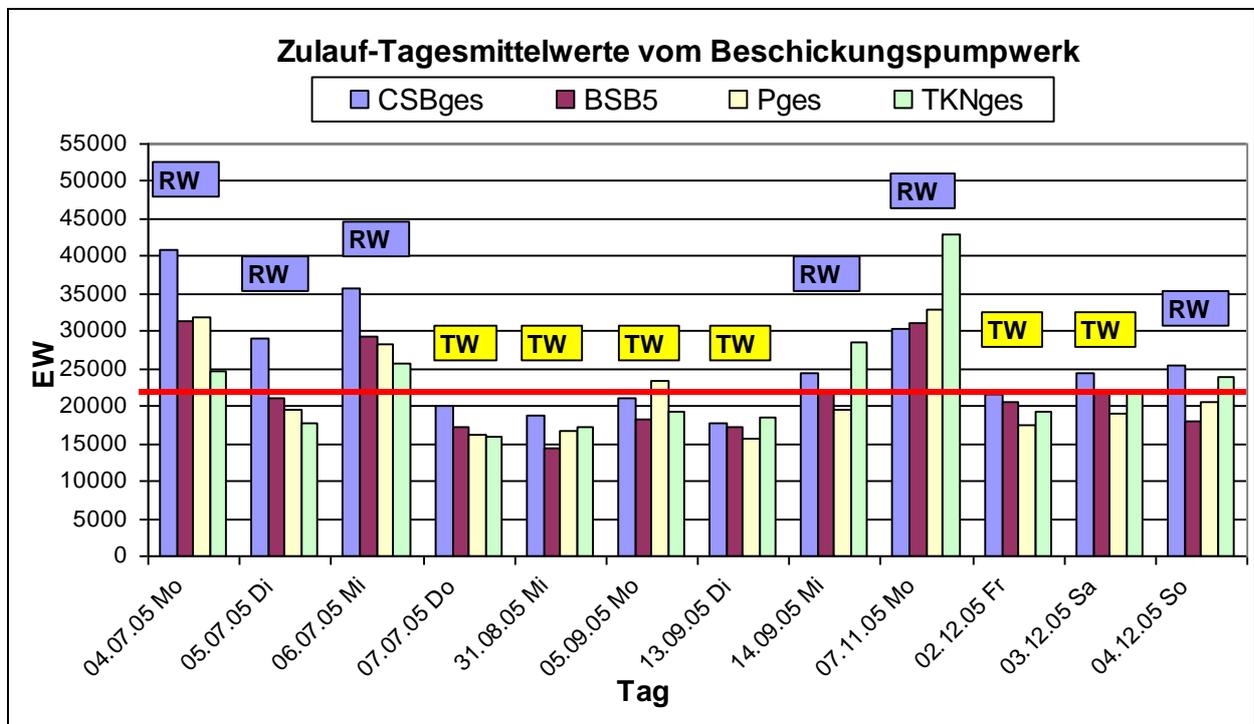


Abbildung 6: Zulaufbedingungen bei unterschiedlichen Wetterverhältnissen (RW=Regenwetter, TW=Trockenwetter, — Bemessungswert 22.500 EW)

Die 2h-Zulaufmischproben bei Trocken- und Regenwetter zeigten ebenfalls charakteristische, tägliche Frachtzuläufe, die für die Simulation verschiedener Strategien genutzt werden konnten. Zudem ergaben die dokumentierten Zulaufmengen charakteristische und kläranlagen-spezifische Verläufe, die ebenfalls als Grundlage für Optimierungsstrategien auf der Kläranlage zum Einsatz kamen (Abbildung 7).

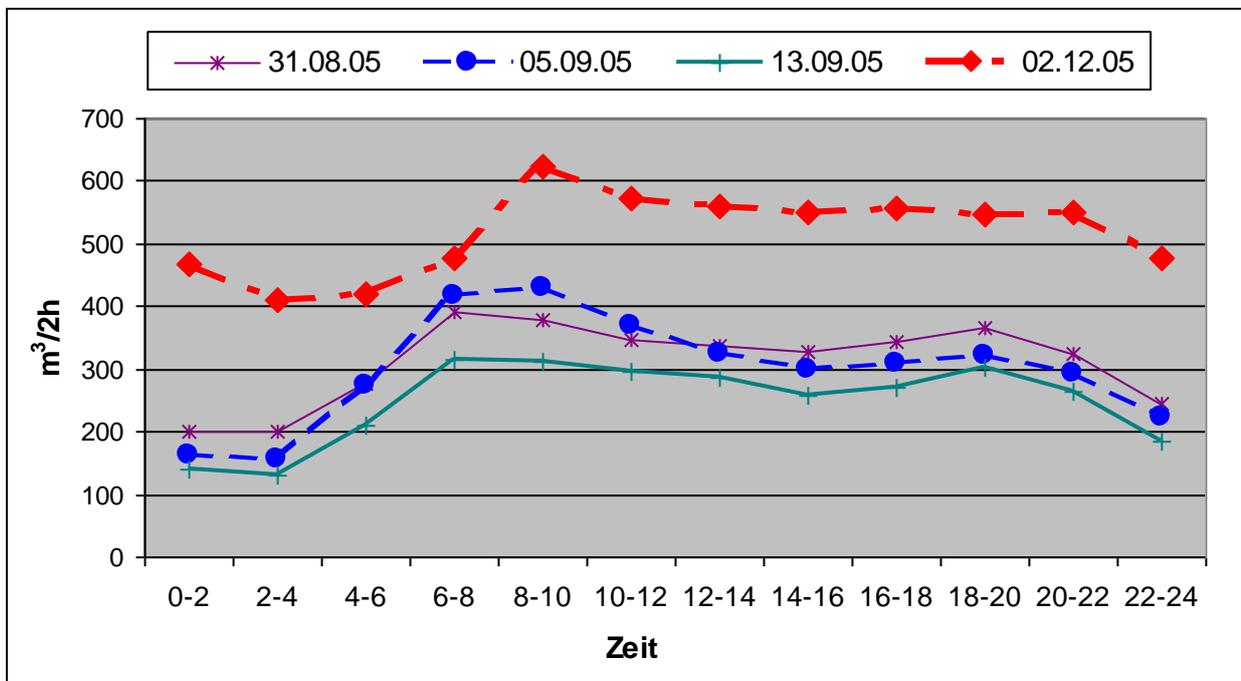


Abbildung 7: 2h-Zulaufmengen im Beschickungspumpwerk bei Trockenwetter, das höhere Niveau am 02.12.05 entsteht durch Schmelzwasserbedingungen

Die Analyse von Proben aus den Pufferbehältern und dem Zulauf in den Leitreaktor waren für die Kalibrierung und Validierung des Simulationsmodells unerlässlich. Die Messwerte vom Ablauf gaben Aufschluss über die Reinigungsleistung und waren ebenfalls zur Justierung des Modells notwendig.

Die kinetischen und stöchiometrischen Eigenschaften des Belebtschlammes wurden mit Hilfe von oxygen, nitrate und phosphat uptake rates (OUR, NUR, PUR) ermittelt und für die Kalibrierung der internen Vorgänge in den Reaktoren verwendet. Die Ergebnisse dienten der Vereinfachung der Kalibrierung und Validierung des Simulationsmodells und werden in Tabelle 1 zusammengefasst.

Simulationsmodelle

Um das ökologische und ökonomische Potenzial eines integrierten Ansatzes abschätzen zu können, wurden detaillierte Modelle von Kanalnetz und Kläranlage erstellt. Alle Erkenntnisse aus der Messphase und die entsprechend aufbereiteten Daten konnten zur Verifizierung der Simulationsmodelle herangezogen werden.

Zur Erarbeitung von verschiedenen Strategien für verschiedene Belastungssituationen auf der Kläranlage oder der Abschätzung von Auswirkungen durch Veränderungen im Kanalnetz sind Simulationsmodelle unverzichtbar. In Spenge wurde, insbesondere aus Sicht der SBR-Technologie und der Betriebsführung von zwei Pufferbehältern bei integriertem Betrieb von Kanalnetz und Kläranlage, Neuland betreten, vor allem auch für die Bereiche der Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik. Dies machte es erforderlich, dass zunächst vertiefte Kenntnisse über das zu erwartende Betriebsverhalten von Kanalnetz und Kläranlage gewonnen werden, bevor großtechnische Versuche durchgeführt werden.

Kanalnetz

Durch die gute Datenlage in Spenge konnte ein sehr detailliertes Modell zur Schmutzfrachtsimulation mit dem Schmutzfrachtmodell KOSMO aufgestellt werden. Schmutzfrachtmodelle werden häufig nicht an die real auftretenden Verhältnisse angepasst, da sich die Anwendung zur Nachweisführung der Mischwasserbehandlung häufig auf relative Vergleiche bezieht. Im vorliegenden Projekt wurde das aufgestellte Modell nicht nur hydraulisch (s. Abbildung 8) sondern auch stofflich (Abbildung 9) verifiziert. Die komplexen Fließvorgänge im Zulaufbereich der Kläranlage Spenge konnten dadurch detailgetreu nachgebildet werden. Sollen mit den im Modell erzeugten Abfluss- und Konzentrationsganglinien bei Trocken- und Regenwetter auch Strategien auf der Kläranlage erarbeitet werden, ist eine solche umfangreiche Verifizierung erforderlich.

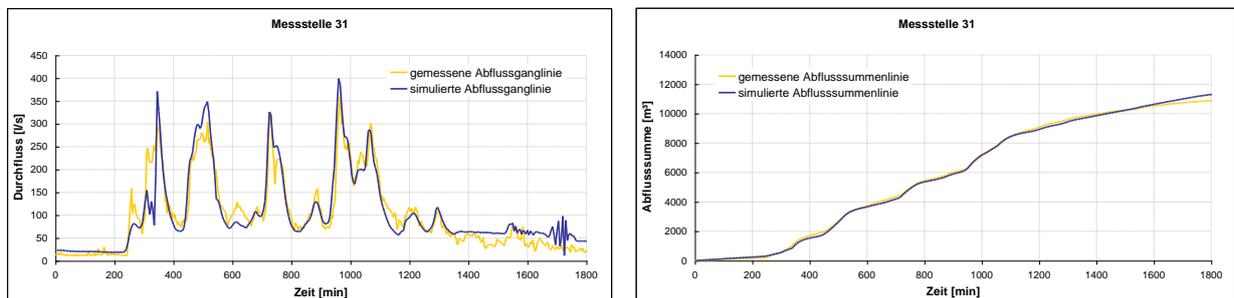


Abbildung 8: Beispiel zur hydraulischen Anpassung Schmutzfrachtmodell (Regenereignis am 15.09.2005) an einer Messstelle

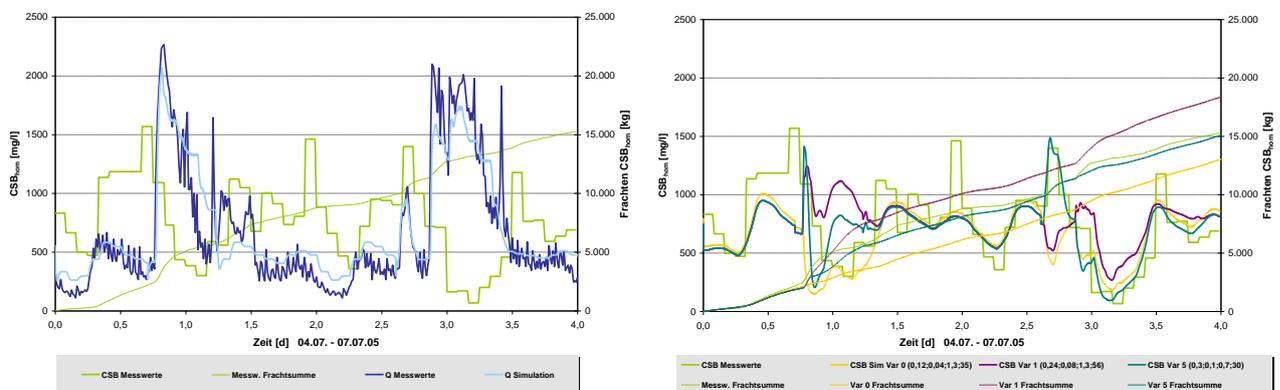


Abbildung 9: Beispiel stoffliche Anpassung Schmutzfrachtmodell (Regenereignis am 04.07.2007) im Kläranlagenzufluss

Kläranlage

Zur dynamischen Simulation der SBR-Kläranlage wurde die Software SIMBA[®] 4.2 vom ifak - Institut für Automation und Kommunikation e.V. Magdeburg sowie MATLAB[®] 6.1 und Simulink[®] von the Mathworks, inc. genutzt. Dabei wurde die noch wenig untersuchte, kombinierte ASM3-EAWAG-BioP-Matrix verwendet. Diese Matrix umfasst die sehr ausführliche Darstellung von Nitrifikations-, Denitrifikations- und zusätzlich von Bio-P-Eliminationsvorgängen, wie sie in den SB-Reaktoren stattfinden. Zudem simuliert die ASM3-Matrix Speichervorgänge, die u.a. im Pufferbehälter 1 vorkommen. Das kombinierte Modell erlaubt die Beurteilung der Gesamtemission von CSB_{ges} , BSB_{ges} , $N_{gesanorg}$, NO_3 , NH_4 und P_{ges} und ermöglicht zudem zum ersten Mal eine umfassende Betriebskostenanalyse, die die Strom-, Schlamm- und Fällmittelkosten berücksichtigt. Dies wird im Besonderen bezüglich der Klimaschutz- und CO_2 -Emissionsdiskussion zukünftig von großer Bedeutung sein. Die Messkampagnen zur Fraktionierung des Zulaufs sind zudem im Vergleich zum ASM2d einfacher und noch kostengünstiger als bei ASM1 oder ASM2d.

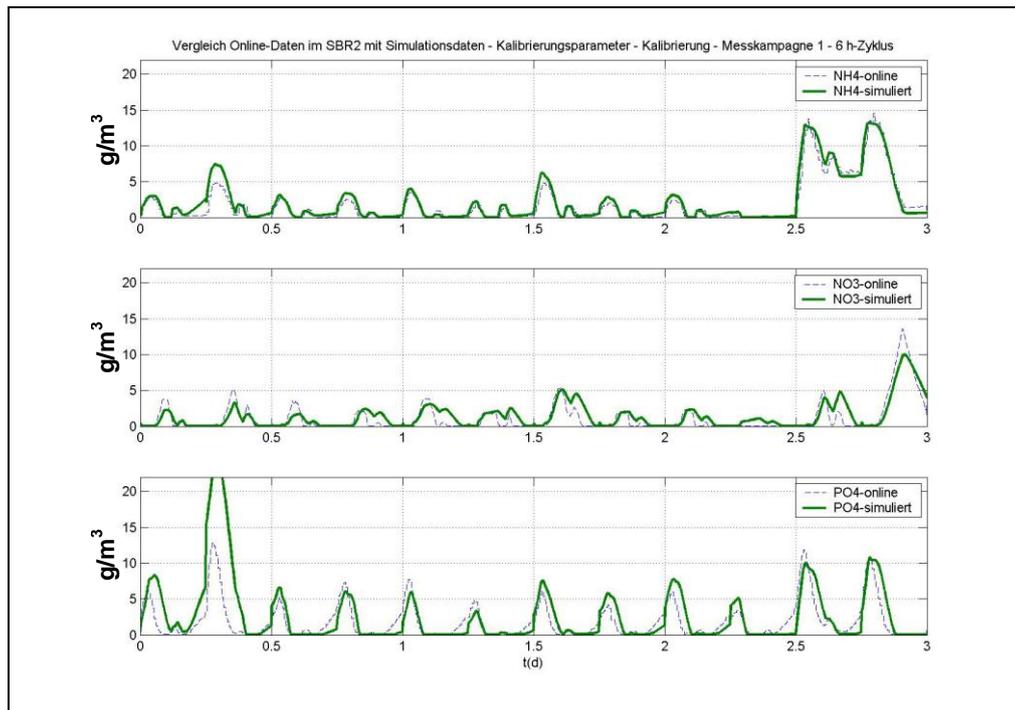
Zur Durchführung von integrierten Studien unter verschiedenen Mischwasserbelastungssituationen war es notwendig, ein Gesamtmodell zu erstellen, das alle relevanten Behälter und Regelstrategien berücksichtigt. Hierzu wurden im Gesamtmodell die zwei Pufferbehälter und die drei SB-Reaktoren in dreischichtigen SBR-Simulationsblöcken dargestellt und konfiguriert. Des Weiteren wurde ein Beschickungspumpwerk generiert, das den Zulauf und die Verteilung der Zuläufe auf die Pufferbehälter und die SBR-Reaktoren simuliert. Ein Konvertierungsblock diente dazu, den Kläranlagenzulauf aus den Kanalsimulationen verschiedener Belastungsereignisse in eine geeignete Fraktionierung umzuwandeln. Alle relevanten Regel- und Steuerungstechniken der Kläranlage wurden basierend auf Simulinkblöcken integriert. Damit zählt es zu den bislang umfangreichsten Kläranlagen-Modellen.

Aufgrund der Größe des Modells ergaben sich zu lange Berechnungslaufzeiten. Daher wurde zur Vereinfachung der Kalibrierung und Validierung ein Kalibrierungsreaktormodell nur vom gemessenen Leitreaktor SBR2 erstellt und mit Hilfe der Messdaten möglichst optimal eingestellt (Abbildung 10a).

Danach wurde das Gesamtmodell mit dem Kalibrierparametersatz 1 überprüft (Tabelle 1). Es war eine Nachjustierung der Kinetiken im Pufferbehälter 1 und in den Reaktoren notwendig. Die gute Übereinstimmung der stofflichen Größen von NH_4 , NO_3 und PO_4 in den internen Vorgängen bei der Simulation mit den realen Bedingungen wird in Abbildung 10b gezeigt.

Die kinetischen und stöchiometrischen Parameter, die sich aus der Simulation des SBR2 als Kalibrierungsreaktormodell und aus dem Gesamtmodell ergeben sind in der Tabelle 1 aufgeführt. Die fettgedruckten Zahlen zeigen die Unterschiede zwischen Kalibrierungsreaktor- und Gesamtmodell. Ersichtlich wird auch, dass nicht alle Kinetiken für das Modell geeignet waren, die mit Hilfe der OUR bzw. NUR bestimmt wurden.

a)



b)



Abbildung 10: Vergleich der gemessenen Onlinewerte des SBR2 mit den Simulationsdaten (a) unter Verwendung des Kalibrierparameterdatensatzes 1 in der Messkampagne 1 im Kalibrierungsreaktormodell und (b) unter Verwendung des Kalibrierparameterdatensatz 2 in der Messkampagne 6 im Gesamtmodell

Tabelle 1: Kalibrierparameterdatenstze für die ZKA Spenge

Parameter	Kalibrierparameter 1 SBR2/ Kalibrierungs- reaktormodell	Kalibrierparameter 2 SBR2/Gesamtmodell	Kalibrierparameter 2 Puffer 1/Gesamtmodell	OUR/NUR	Standard
$Y_{H,aer}$	0,8	0,8	0,8	0,8*	0,8
$Y_{STO,aer}$	0,8	0,8	0,8	0,8*	0,8
$Y_{H,anox}$	0,78	0,78	0,78	0,78*	0,65
$Y_{STO,anox}$	0,78	0,78	0,78	0,78*	0,7
K_H	9	9	1	-	9
$\mu_{max,H}$	3	3	3	7/2,5*	3
KHS	10	10	10	10*/5	10
b_H	0,2	0,2	0,2	0,11/0,12*	0,3
etaHend	0,33	0,33	0,33	1	0,33
K_{HO_2}	0,05	0,05	0,05	-	0,2
$\mu_{max,A}$	1,2	1,2	1,2	0,9	1
YA	0,24	0,24	0,24	0,24*	0,24
b_A	0,06	0,02	0,02	0,06*/0,09	0,2
KN_{NH_4}	0,6	0,6	0,6	0,6*	1
$\mu_{max,PAO}$	1,2	1,4	1,4	7/2,5	1
KSS_PAO	10	10	10	10*/5	10
$b_{PAO_{20}}$	0,07	0,07	0,07	0,11*/0,12	0,2
etaNOend_PAO	0,33	0,33	0,33	1	0,33
$Y_{PAO_{O_2}}$	0,6	0,6	0,6	0,8	0,6
$Y_{PAO_{NO}}$	0,55	0,55	0,55	0,78	0,5
Y_{PO_4}	0,35	0,24	0,24	-	0,35
iPS_s	0,005	0,0	0,0	-	0
iPS_i	0,003	0,0	0,0	-	0
iPX_i	0,02	0,01	0,01	-	0,01
iPX_s	0,01	0,005	0,005	-	0,005
iPX_{BM}	0,028	0,014	0,014	-	0,014

* adquate Übereinstimmung mit den Modellparametern

Der Belebtschlamm der ZKA Spenge zeichnet sich durch sehr niedrige Sterberaten der heterotrophen, autotrophen und BioP-Bakterien aus. Außerdem ist die hohe Wachstumsrate der autotrophen Organismen und der geringe KNH auffällig. Diese Kriterien an sich erklären schon die gute Reinigungsleistung des Belebtschlammes der ZKA Spenge.

Aufgrund der ebenfalls sehr guten hydraulischen Übereinstimmung des Modells konnten mit dem Gesamtmodell verschiedene, hydraulische Lastfälle zur integrierten Betrachtung untersucht werden.

Simulationsstudien und Strategien

Kanalnetz

Die Schmutzfrachtsimulation hat gezeigt, dass eine mittlere Entlastungsrate von 24 % in Spenge zu erwarten ist. Der sehr geringe Wert resultiert einerseits aus dem insgesamt hohen Speichervolumen der RÜB von ca. 48 m³/ha $A_{E,b}$. Andererseits sind die Drosseln an den meisten Becken sehr hoch eingestellt, was eine sehr geringe Entlastungstätigkeit verursacht. Weiterhin kann im größtenteils flachen Kanalnetz bei Regenereignissen Kanalvolumen aktiviert werden. Die einzelnen Becken scheinen hierbei insgesamt relativ ungleichmäßig ausgelastet zu sein. Als Entlastungsschwerpunkte wurden drei Bauwerke (RÜB 2 Lenzinghausen, RÜB 5 Friedhof und RÜB 10 KA Spenge) identifiziert.

Da die Kläranlage Spenge auch für größere Durchsatzkapazitäten als der derzeitige Bemessungszufluss ausgelegt ist, wurde untersucht, wie diese erhöhten Zuflussstufen durch Drosselanpassungen aus dem Kanalnetz erreicht werden können und ob aus Emissionssicht eine Beschickung über den derzeitigen Bemessungszufluss hinaus sinnvoll ist. In Spenge ist die Besonderheit gegeben, dass auf der Kläranlage zwei sehr große Pufferbehälter zur Verfügung stehen. Sowohl hydraulisch als auch stofflich wurde deshalb für die Zuflüsse aus dem Kanalnetz keine bestimmte Steuerungsphilosophie verfolgt. Die Pufferbehälter werden gezielt zur Regelung der innerhalb des DIC-SBR-Verfahrens „jeweils gewünschten Zuflusskonzentration“ genutzt. Für ein detailliertes Steuerungskonzept, um die sich quantitativ und auch geringfügig qualitativ unterscheidenden Zuflüsse aus den verschiedenen Hauptsammlern zeitlich gesteuert zur Kläranlage zu leiten, bestand demnach kein Erfordernis. Es wurde daher ein Konzept mit statischen Anpassungen von wenigen Drosselabflüssen vorgeschlagen. Untersucht wurde die Erhöhung von Abflüssen am Becken 3, Becken 5, Becken 10 (mit Trennbauwerken TB-2 und TB-3), sowie dem internen Trennbauwerk TB-1.

Die Untersuchung von erhöhten Kläranlagenzuflüssen hat gezeigt, dass sich erhöhte Drosselabflüsse aus Kanalnetz-Sicht in allen betrachteten Belastungsparametern positiv auf das Gewässer auswirken. Entlastungsvolumen und -frachten können in entscheidendem Maß verringert werden (z.B. bei $Q_M = 250$ l/s die CSB-Fracht um 21 %, NH₄-N-Fracht um 32 %; s. auch Abbildung 11).

Auch die Anzahl der Entlastungsereignisse verringert sich merklich und damit können kleinere Entlastungsereignisse ganz vermieden werden. Aufgrund ungünstiger Mischungsverhältnisse können die Entlastungskonzentrationen gerade bei solchen Ereignissen sehr hoch sein. Eine Erhöhung des Abflusses über 250 l/s hinaus hat allerdings keine weitere deutliche Verbesserung mehr gebracht.

Neben Untersuchungen auf Jahresbasis wurden auch einzelne Regenereignisse unterschiedlicher Charakteristika für die verschiedenen Zuflussstufen betrachtet (s. Abbildung 12).

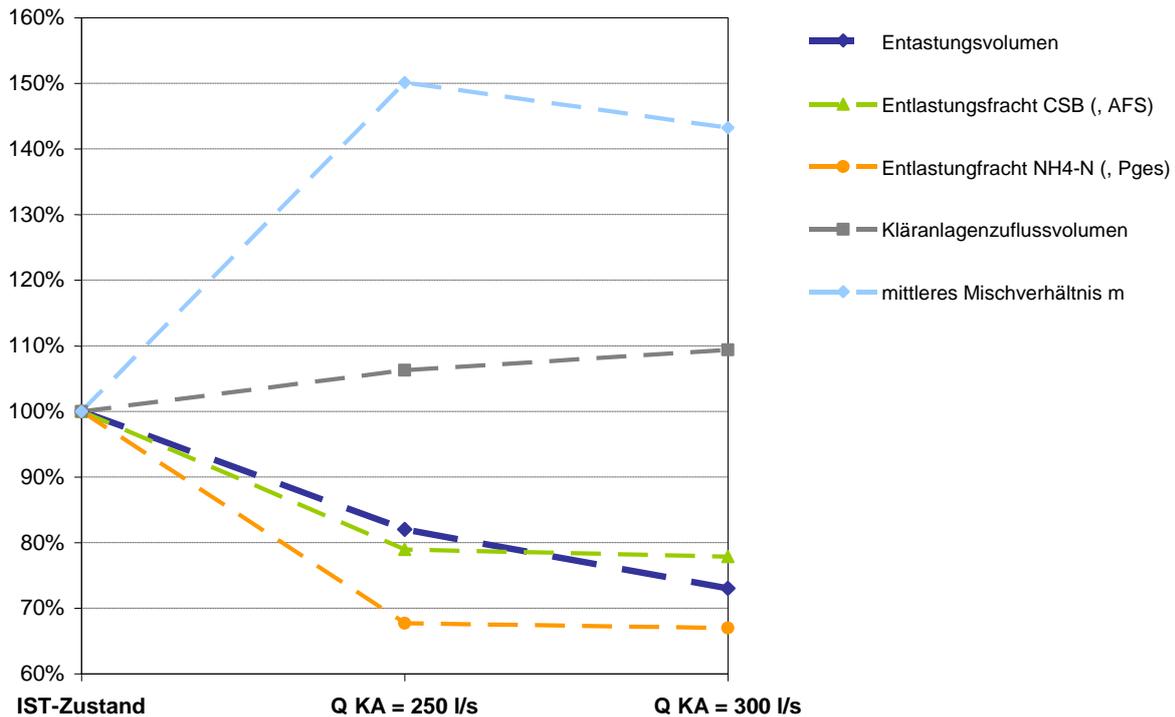


Abbildung 11: Prozentuale Veränderung der Entlastungskennwerte bei Erhöhung der Drosselabflüsse

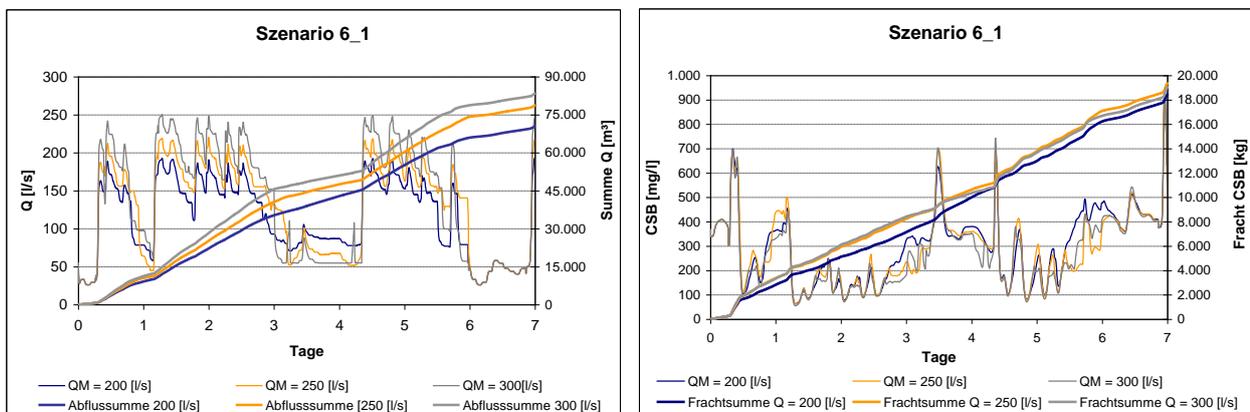


Abbildung 12: Kläranlagenzuflüsse und CSB-Konzentrationen (Szenario 6-1- 06.02.1977)

Kläranlage

Die Simulationsstudien der Kläranlage wurden grob unterteilt in die Optimierung der Reinigungsleistung und die Optimierung der hydraulischen Leistung. Bei der Optimierung der Reinigungsleistung wurden Trocken- und Regenwetterbedingungen aus den Messkampagnen untersucht, während zur Optimierung der hydraulischen Leistung zudem verschiedene Regenereignisse aus der Kanalnetzsimulation verwendet wurden. Es wurden ca. 500 Simulationsanalysen mit dem Kläranlagenmodell durchgeführt und 18 GB an Daten produziert. Die maximalen Ablaufwerte von N_{ges} , NO_3 , NH_4 , P_{ges} und CSB_{ges} sowie die Laufzeiten der Aggregate, die Über-

schuss- und RS-Schlammengen und die Fällmittelmengen wurden dokumentiert und zur Berechnung der Betriebskosten verwendet.

Strategien zur Steigerung der Reinigungsleistung der Kläranlage

Die Simulationen zur Optimierung der Reinigungsleistung umfassten die Optimierung des RS-Verfahrens, die Optimierung des Ausgleichs über den Pufferbehälter 1, die Optimierung des DIC-SBR-Verfahrens und der Einstellung der Zyklusstrategie sowie die Optimierung der Belüftung erstmals auch unter temperaturabhängigen Aspekten.

Im Modell konnten die Nitrat- und Phosphatablaufwerte bei der Anwendung des RS-Verfahrens gesenkt werden, wenn nicht länger als 40 min RS im Reaktor abgezogen wurde. Damit konnte zum ersten Mal die Verbesserung der Reinigungsleistung auch bei der BioP-Elimination mit Hilfe der Simulation nachgewiesen werden. Dabei war es unerheblich, zu welchem Zeitpunkt in einem Zyklus die RS-Entnahme stattfand. Am kostengünstigsten war es jedoch, RS in der Sedimentationsphase ca. 10 bis 15 min abzuziehen.

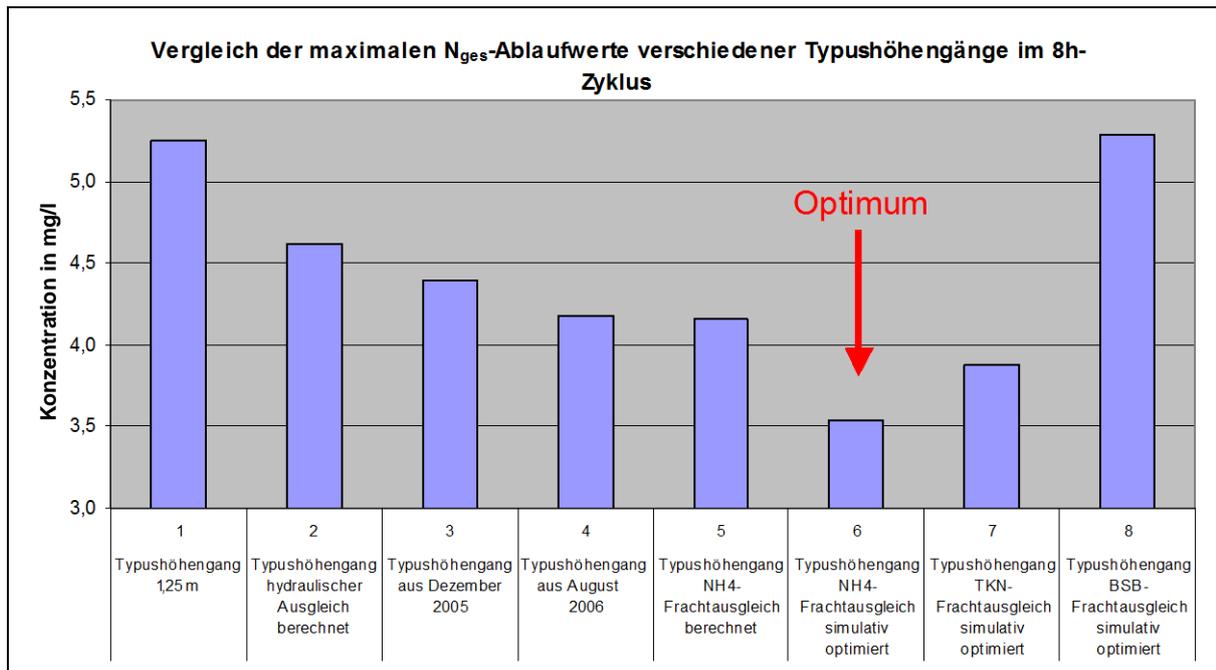
Simulationsanalysen zum Ausgleich des täglichen Zulaufs unter Trockenwetterbedingungen durch den Pufferbehälter 1 nach unterschiedlichen Methoden (hydraulisch, manuell mit Hilfe der Onlinedaten, frachtabhängig und durch Simulation optimiert) ergaben, dass der Ausgleich über den sog. Typushöhengang basierend auf einem NH_4 -Frachtausgleich und anschließender iterativer Optimierung im Simulationsmodell die niedrigsten maximalen N_{ges} - und NO_3 -Ablaufwerte lieferte (Abbildung 13a). Die anderen Ablaufwerte blieben unverändert.

Dieser Typushöhengang erwies sich bezogen auf die Betriebskosten auch noch als kostengünstigste Variante, wobei die manuelle Einstellung mit Hilfe der Onlinedaten mit zu den teuersten Methoden gehörte (Abbildung 13b). Anhand dieses Beispiels wird noch einmal der Vorteil von Simulationsanalysen gegenüber großtechnischen Versuchen deutlich.

Bei der Optimierung des DIC-SBR-Verfahrens stand im Vordergrund, das geeignete Mengenverhältnis der 1. und 2. Beschickung zu ermitteln, das erfahrungsgemäß je nach Kläranlage zwischen 70% zu 30% und 90% zu 10% vom Gesamtvolumen pro Zyklus variieren kann. Beim 8h-Zyklus lagen die maximalen N_{ges} -, NO_3 - und NH_4 -Ablaufwerte bei der ZKA Spenge beim Verhältnis 90% zu 10% am niedrigsten. Allerdings waren die PO_4 -Ablaufwerte hierbei höher. Beim 6h-Zyklus lagen alle Ablaufwerte beim Verhältnis 80% zu 20% am tiefsten. Zudem wurde der optimale Zeitpunkt der 2. internen Beschickung im 8h- und 6h-Zyklus bestimmt. Eine optimale Einstellung wirkte sich positiv auf die Gesamtemission aus, verhielt sich aber im Jahresmittel kostenneutral.

Zur Optimierung der Belüftung wurde bei allen Zeitzyklen zunächst eine NH_4 -Begrenzung unter extremen Hochlastbedingungen untersucht, die nur ca. fünfmal pro Jahr bei der ZKA Spenge auftreten. Dies sollte gewährleisten, dass die Überwachungswerte in keinem Fall überschritten werden. Die maximalen N_{ges} - und NO_3 -Ablaufwerte konnten um ca. 30% gesenkt werden. Die maximalen NH_4 - und PO_4 -Ablaufwerte lagen dabei immer noch unterhalb der Überwachungswerte, wobei beide Ablaufwerte unter mittleren Zulaufbedingungen weit unter 1 mg/l lagen, also aus ökologischer Sicht unbedenklich. Aus ökonomischer Sicht war diese Einstellung im 8h- und 6h-Zyklus kostengünstiger. Bei kürzeren Zeitzyklen hingegen verhielt sich diese Maßnahme im Jahresmittel kostenneutral.

(a)



(b)

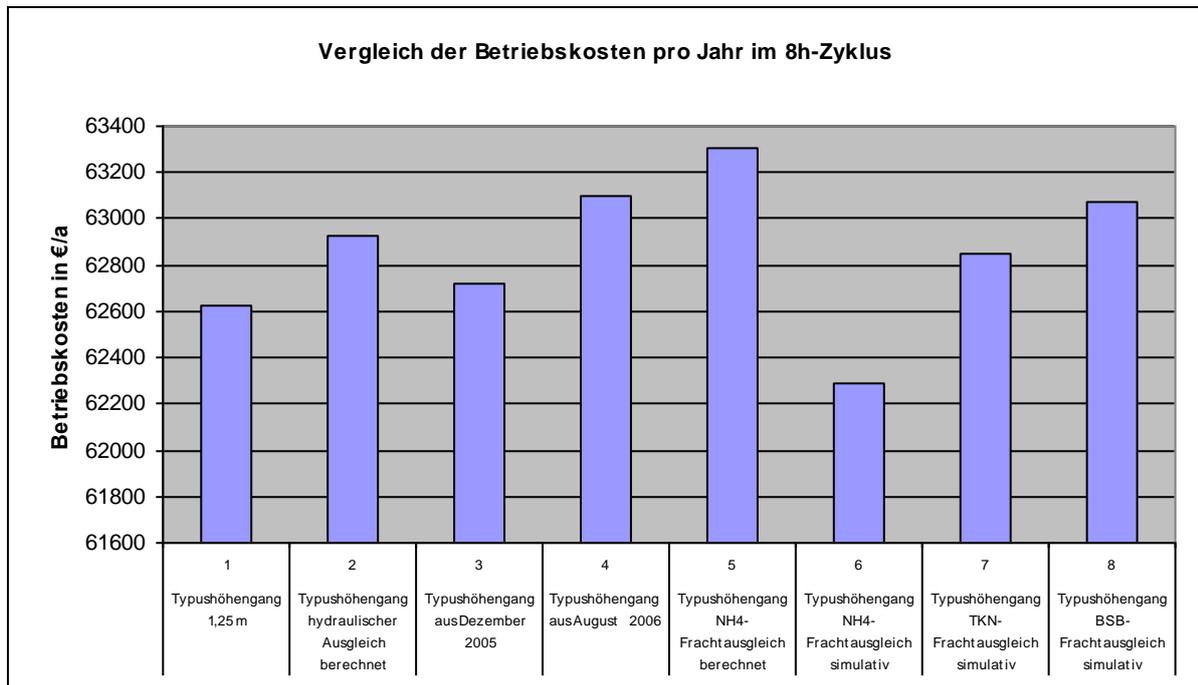


Abbildung 13: Vergleich (a) der maximalen Ablaufwerte und (b) der Betriebskosten bei unterschiedlichen Typushöhengängen

Eine NO_3 -Begrenzung wurde zusätzlich in den kürzeren Zyklen analysiert, die sich im gleichen Maße wie die NH_4 -Begrenzung auswirkte (Abbildung 14). Die Analyse bei unterschiedlichen Temperaturen wurde in diesem Forschungsvorhaben erstmals durchgeführt und zeigte deutlich, dass sich eine temperaturabhängige Einstellung der Belüftung für eine Kläranlage ohne NH_4 - und NO_3 -Begrenzung auf alle Fälle in Bezug auf die Gewässeremission und Betriebskosten lohnt.

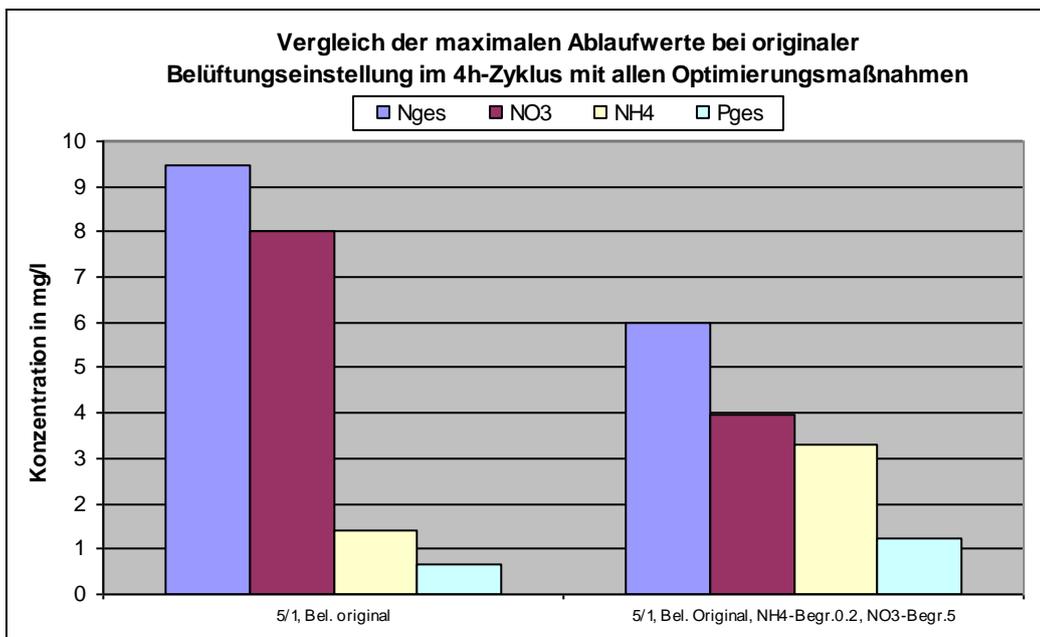


Abbildung 14: Auswirkung aller Optimierungsmaßnahmen auf die maximalen Ablaufwerte bei einem Hochlasttag der Messkampagne 1, 4h-Zyklus, 18 °C

Strategien zur erhöhten Mischwasserbehandlung auf der Kläranlage

Die Optimierung der hydraulischen Leistungsfähigkeit umfasste die Ermittlung geeigneter Merkmale für den Sprung in geringere Zeitzyklen bei Regenereignissen, den Vergleich der Steigerung der hydraulischen Leistung durch kürzere Zeitzyklen oder durch Erhöhung der Dekantiermengen, die Analyse zur Bewirtschaftung der Pufferbehälter, die Auswirkung bei erhöhter Mischwassermitbehandlung und die Untersuchung des Optimierungspotentials bei einem automatisch gesteuerten Sprung in längere Zeitzyklen nach Ende eines Regenereignisses.

Untersucht wurden folgende Zulaufmerkmale: Zulaufmengen in l/s, Regenmengen in mm/30 min, pH, O₂, SAK- und TS-Wert. Weiterhin wurden die Höhenstände der Pufferbehälter analysiert. Nur die Zulaufmengen in l/s oder in m³/30 min und die Regenmengen in mm/30 min konnten als geeignete Merkmale des Zulaufs genutzt werden, um ein Regenereignis rechtzeitig anzuzeigen. Der Höhenstand im Puffer 1 war nicht direkt verwendbar; ein besserer Parameter war die Anstiegsgeschwindigkeit in der Höhe beim Einsetzen eines Regenereignisses. Als zusätzliches Merkmal kann der Höhenstand des Puffers 2 genutzt werden.

In weiteren Analysen konnten die oben genannten Merkmale eingesetzt werden, um den Sprung in kürzere Zeitzyklen zu optimieren. In der Simulation waren die maximalen N_{ges} -, NO_3 -

und NH_4 -Ablaufwerte um so geringer, je mehr von dem anfänglichen Spülstoß eines Regenerereignisses in längeren, reinigungsstärkeren Zeitzyklen abgearbeitet werden konnte (Abbildung 15). Dabei blieben die Betriebskosten unverändert.

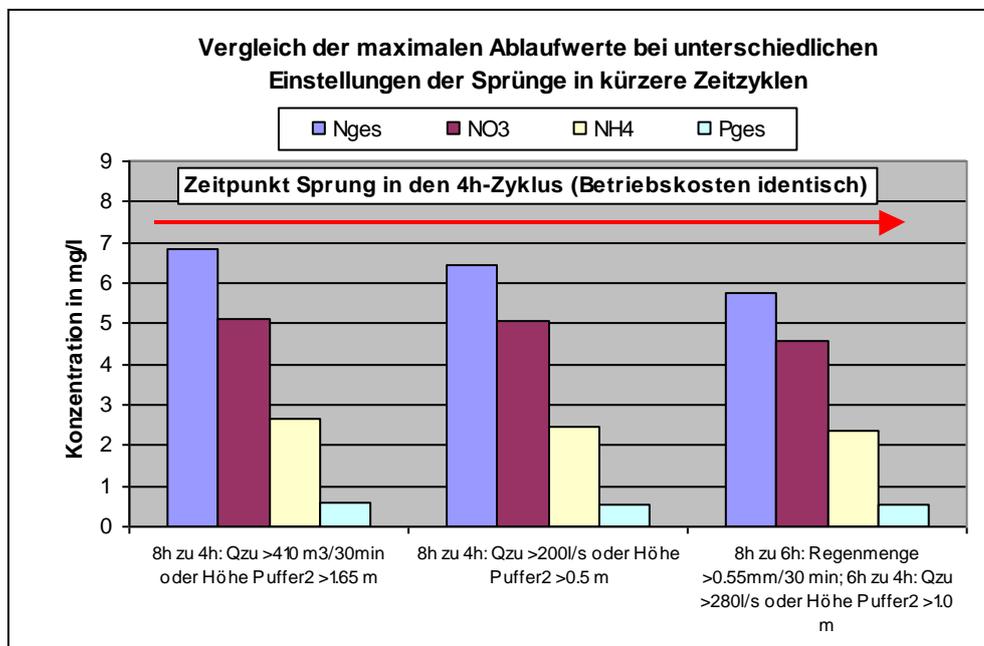


Abbildung 15: Vergleich der maximalen Ablaufwerte bei unterschiedlichen Einstellungen in kürzere Zeitzyklen

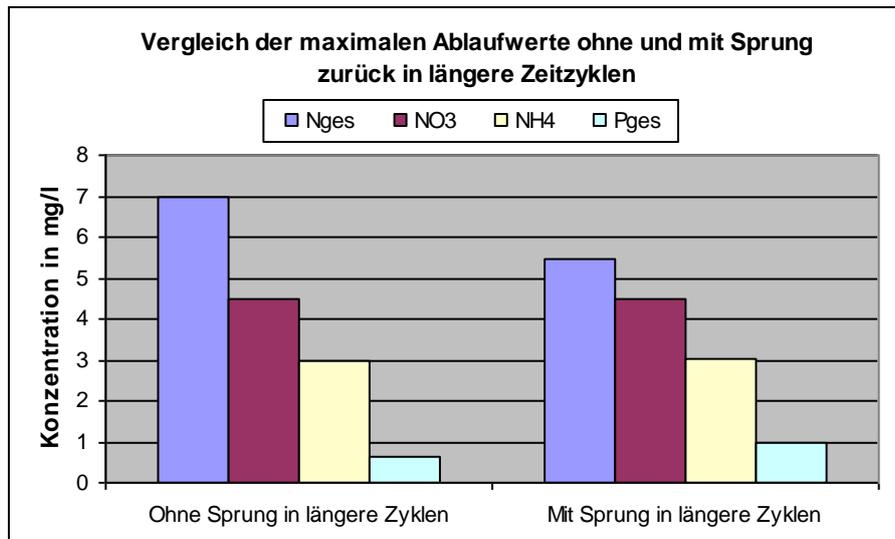
Die Steigerung der Dekantiermengen führte zu höheren N_{ges} - und NO_3 -Ablaufwerten und zur Steigerung der Betriebskosten. Daher sollte die bereits vorher bestehende Strategie durch Verkürzung der Zeitzyklen bei einem Regenereignis mit den oben aufgeführten Optimierungen bevorzugt eingesetzt werden.

Bei der Bewirtschaftung der beiden Pufferbehälter war es am günstigsten zuerst den Puffer 1 möglichst voll zu füllen und dann erst den Puffer 2 zu beschicken. Darüberhinaus ist es etwas kostengünstiger, aber mit geringfügig höheren Ablaufwerten verbunden, zuerst den Puffer 2 und dann den Puffer 1 zu entleeren, als beide gleichzeitig.

Bei den Simulationsstudien konnte die ZKA Spenge einen Zulauf bis zu 270 l/s mit den Standardeinstellungen problemlos abarbeiten. Darüber hinaus konnten je nach Regenereignis durch zusätzliche Aktivierung des 3h-Zyklus und/oder Erhöhung der Dekantiermengen teilweise bis zu 300 l/s durchgesetzt werden.

Durch eine automatisch gesteuerte Regeltechnik, die den Sprung in längere Zeitzyklen steuert, können die Ablaufwerte und die Betriebskosten gesenkt werden (Abbildung 16).

(a)



(b)

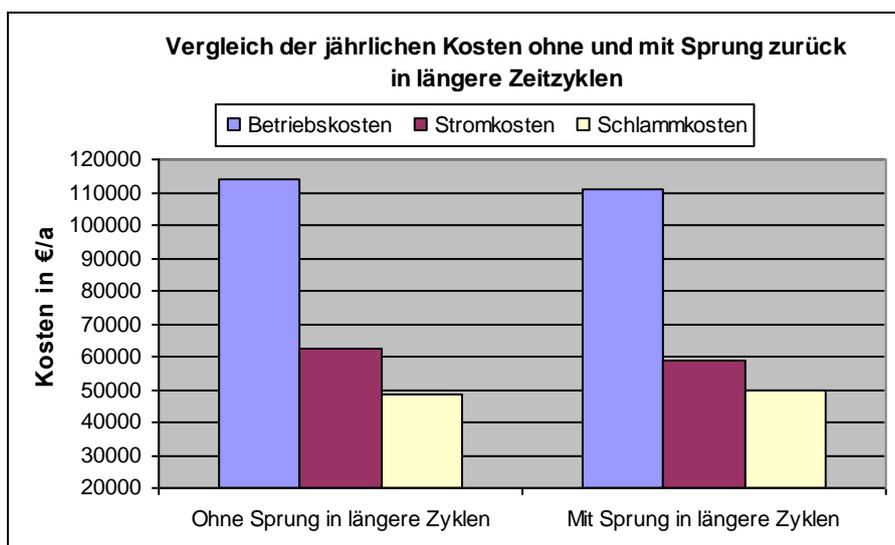


Abbildung 16: Vergleich der maximalen Ablaufwerte (a) und Betriebskosten (b) ohne und mit Sprung zurück in längere Zeitzyklen nach Ende eines Regenereignisses

Integrierte Betrachtung

Die Gesamtemissionen aus Kanalnetz und Kläranlage wurden für ein „mittleres“ Jahr betrachtet. Die Entlastungsfracht aus dem Kanalnetz ergibt sich hierbei direkt aus den Ergebnissen der Schmutzfrachtsimulation. Die Ablauffracht der Kläranlage wurde über das Zuflussvolumen berechnet, das durch die detaillierten Simulationen des mittleren Jahres genau für Trockenwetterzeiten und Mischwasserzufluss bestimmt werden konnte. Für Trockenwetter- und Mischwasserzufluss wurden hierbei verschiedene Ablaufkonzentrationen angesetzt. Diese Betrachtung von jahresbezogenen Gesamtemissionen aus Kanalnetz und Kläranlagenablauf hat bei einem Bereich für den Kläranlagenzufluss von etwa 250 l/s ein Optimum gezeigt. Bezogen auf das

Gesamtsystem können dann im Vergleich zum IST-Zustand bei Regenwetter jährlich 8% der CSB-Emissionen und sogar 27 % der Ammonium-Frachten eingespart werden.

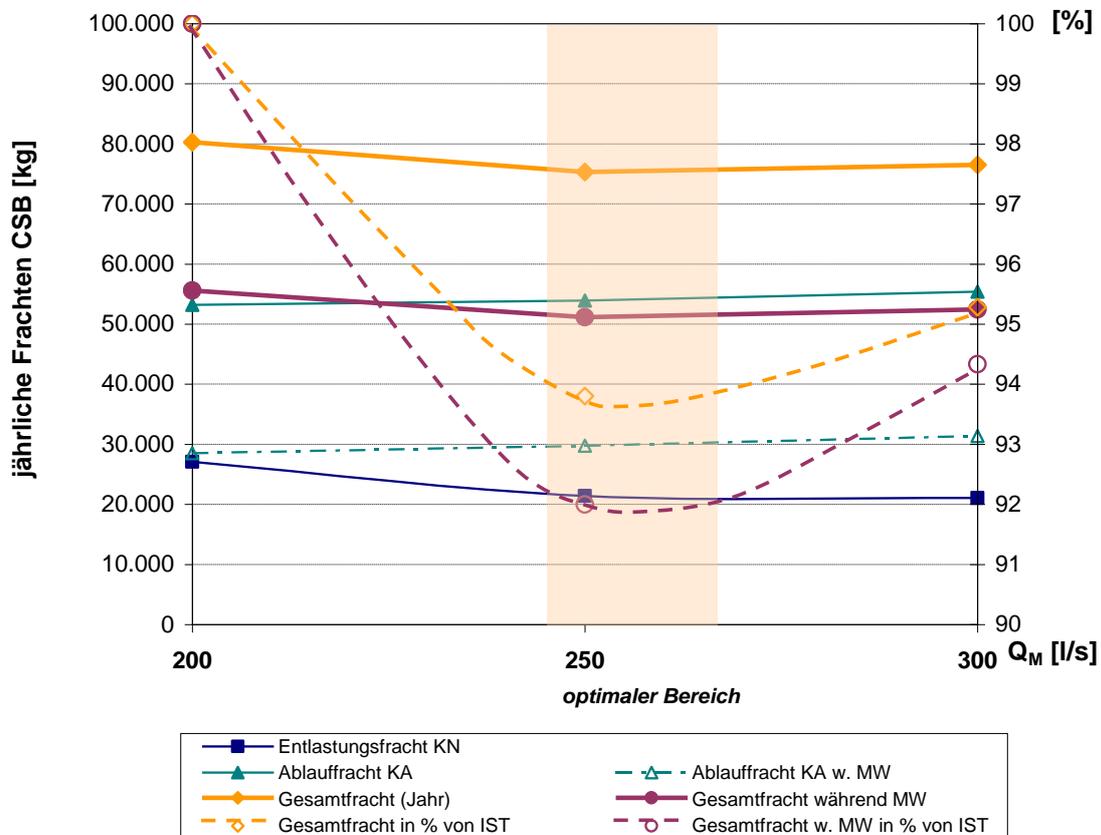


Abbildung 17: Ermittlung des optimalen Kläranlagenzuflusses für Spenge

Eine Verbesserung der Entlastungstätigkeiten ist bereits durch wenige Änderungen im Kanalnetz möglich. Durch eine integrierte Betrachtung von Kanalnetz und Kläranlage können im Bereich des Kanalnetzes durch eine Verringerung der Beschickungshäufigkeit von Becken Betriebskosten, insbesondere der Aufwand zur Beckenreinigung, eingespart werden.

Während Entlastungen aus dem Kanalnetz eher stoßweise in kurzen Zeiträumen auftreten, wird bei einer „Verschiebung“ von zuvor noch entlasteten Frachten hin zur Kläranlage der Frachteintrag in die Gewässer „gleichmäßiger“ verteilt. I.d.R. sind Ablaufkonzentrationen von Kläranlagen auch niedriger als mittlere Entlastungskonzentrationen aus dem Kanalnetz. Mit steigendem Drosselabfluss zur Kläranlage erhöht sich der Anteil des mitbehandelten Regenwassers. Die erhöhten hydraulischen Belastungen nehmen dabei kürzere Zeiträume in Anspruch als bei geringeren Drosselabflüssen. Die Kläranlagensimulation hat ergeben, dass auf der ZKA Spenge Zuflüsse über 200 l/s hinaus wirtschaftlich abgearbeitet werden können. Die detaillierte Betrachtung von einzelnen Szenarien mit erhöhter Beschickung hat allerdings gezeigt, dass nicht bei allen Belastungssituationen ein Zufluss über die derzeitigen 200 l/s hinaus sinnvoll ist.

Es lässt sich nämlich ableiten, dass bei Belastungssituationen, in denen eine geringe Abwassertemperatur vorliegt, lange Regendauern auftreten und ein hoher Fremdwasserzufluss zu erwarten ist, eine Beschickung der Kläranlage über die derzeitigen 200 l/s hinaus eher nicht stattfinden sollte. In den Sommermonaten dagegen und bei zu erwartenden geringen Regendauern in den Wintermonaten kann durchaus der Zufluss zur Kläranlage erhöht werden (Tabelle 2). Aus Gewässersicht ist dies besonders im Sommer bedeutsam, da bei hohen Temperaturen die Sauerstofflöslichkeit eher schlecht und damit die Sauerstoffversorgung im Gewässer beeinträchtigt ist. Die Sauerstoffzehrung ist demgegenüber jedoch erhöht, da die Umsatzraten der Organismen hoch sind.

Tabelle 2: Gesamtfrachten für Szenario 5-2, Abwassertemperatur = 18 °C

Ereignis 18°C	$Q_M = 200 \text{ [l/s]}$ (IST-Zustand) $Q_M = 8,4 Q_S + Q_F$					$Q_M = 250 \text{ [l/s]}$ $Q_M = 10,8 Q_S + Q_F$					$Q_M = 300 \text{ [l/s]}$ $Q_M = 13,2 Q_S + Q_F$					
	KN	KA a)	KA b)	Gesamt a)	Gesamt b)	KN	KA a)	KA b)	Gesamt a)	Gesamt b)	KN	KA a)	KA b)	Gesamt a)	Gesamt b)	
Regenereignis: Szenario 5-2																
Q_E	m³/Ereignis	11.484	65.357	65.358	76.841	76.842	8.360	74.260	74.260	82.620	82.620	6.836	73.434	73.747	80.270	80.583
CSB	kg/ Ereignis	375	1.742	1.742	2.117	2.117	280	2.004	2.004	2.284	2.284	184	1.984	1.996	2.167	2.179
CSB _i		15	657	657	672	672	11	683	683	694	694	8	661	684	669	692
NH ₄ -N		9	8	8	17	17	8	9	9	17	17	4	7	9	11	13
NO ₃		2	24	24	25	25	1	35	35	36	36	1	40	33	41	33
P _{ges}		3	40	40	43	43	3	44	44	47	47	2	40	43	41	44
BSB ₅		98	238	238	336	336	91	290	290	381	381	47	287	286	333	333
AFS		169	886	886	1.055	1.055	127	1.078	1.078	1.204	1.204	85	1.086	1.074	1.171	1.159
TKN		13	63	63	76	76	12	75	75	86	86	6	73	74	79	80
PO ₄ -P		2	28	28	30	30	2	30	30	32	32	1	25	28	26	29
CSB _{mt}		85	704	704	789	789	68	740	740	808	808	44	711	736	755	780

KN Emission Kanalnetz

KA a) Emission Kläranlage bei Verwendung des 3h-Zyklus mit geringfügiger Erhöhung der Dekantiermenge

KA b) Emission Kläranlage ohne Verwendung des 3h-Zyklus mit starker Erhöhung der Dekantiermenge

Großtechnische Umsetzung

Die meisten optimierten Maßnahmen zur Steigerung der Reinigungs- und hydraulischen Leistung der Kläranlage konnten ohne Probleme umgesetzt und eingeführt werden. Für die Berücksichtigung des Zulaufs in l/s, der Regenmenge in mm/30 min und der Geschwindigkeit des Höhenanstiegs im Puffer 1 als zusätzliche Merkmale zum Sprung in kürzere Zyklen müssten erst die technischen Voraussetzungen geschaffen werden. Das gleiche gilt für die Umsetzung des automatischen Sprungs in höhere Zyklen nach Ende eines Regenereignisses.

Die Überprüfungen der eingeführten Strategien haben ergeben, dass fast alle simulierten Ergebnisse bestätigt wurden. Dies ist ein gutes Maß für die Güte des Kläranlagenmodells. Es gab nur Abweichungen bei den P_{ges}-Ablaufwerten, die sich in der Simulation und Realität teilweise konträr verhielten. Daher empfehlen wir die Überprüfung des EAWAG-BioP-Moduls.

Die eingeführten Maßnahmen haben insgesamt zu einer Verringerung der Emission der Kläranlage und der Betriebskosten geführt, wodurch die Betriebsführung der Kläranlage verbessert und gesichert werden konnte. Anhand der Acrondaten (Tabelle 3) wird deutlich, dass die Jahresmittelwerte im Zulauf und Ablauf aufgrund der unterschiedlichen Zulaufjahresmengen nicht direkt zu einer vergleichenden Analyse geeignet sind. Allerdings wird schon der große Unterschied in den Ablaufwerten im Vergleich zur alten Anlage sichtbar und bestätigen die hier gefundenen Simulationsdaten. Das Jahr 2004 wurde nicht berücksichtigt, da in diesem Jahr beide Anlagen in Betrieb waren.

Tabelle 3: Optimierungspotential für die ZKA Spenge bezogen auf die Jahresmittelwerte aus dem Acron

Jahresmittelwerte aus Acron*	N _{ges}	NO ₃	NH ₄	P _{ges}	BSB ₅	CSB
Zulauf mg/l						
2002 Altanlage	31,0	1,58	21	4,0	166	235
2003 Altanlage	42,1	1,04	32	6,9	189	339
2005	41,0	1,89	26	5,3	163	391
2006 teilloptimiert	45,3	1,79	28	6,7	236	547
Ablauf mg/l						
2002 Altanlage	10,9	7,5	1,2	1,0	10	29
2003 Altanlage	12,1	7,6	2,3	1,5	12	39
2005	3,2	1,8	0,2	0,7	8	28
2006 teilloptimiert	2,8	1,4	0,4	0,6	5	26
Jahresgesamtwerte aus Acron	Zulaufmenge m ³ /a	Trockenwettertage Anzahl Tage	Niederschlag mm/m ²	Ablauf Trockenwetter m ³ /a	Ablauf Jahresschmutz- wassermenge m ³ /a	Ablauf Temperatur Jahresmittelwert °C
2002 Altanlage	2908810	-	-	-	2908810	-
2003 Altanlage	1894606	-	-	-	1894606	-
2005	2394008	161	712	677149	2368538	13,7
2006 teilloptimiert	2434017	169	756	723960	2421876	13,8
* MW berechnet aus 24-Mischprobe/Woche						
DIC/RS-SBR-Anlage						

Für vergleichende Analysen wurden die Acrondaten in Frachten umgerechnet und für eine Betriebskostenanalyse wurden die Kosten und Verbräuche auf ein kg BSB₅ bezogen. Die Tabelle 4 zeigt auch hier, dass die Ablaufrachten bei der neuen DIC/RS-SBR-Anlage (2004 und 2005) trotz höherer Schmutzfrachtbelastung deutlich geringer sind als bei der alten Anlage (2002 und 2003).

Die Eliminationsraten in % bezogen auf die Schmutzfrachtbelastung zeigen zudem, dass die neue Anlage auch schon ohne Optimierung sehr hohe Eliminationsraten (bis zu 99%) erreicht. Durch die eingeführten Optimierungsstrategien im Jahre 2006 sind die Eliminationsraten für N_{ges}, P_{ges}, BSB₅ und CSB_{ges} nochmals gestiegen.

Bei der Betrachtung der Betriebskosten wird deutlich, dass die neue DIC/RS-SBR-Anlage bei den Stromkosten, bei der Schlammmenge, der Fällmittelmenge und den gesamten Betriebskosten bereits im Jahr 2005 ohne Optimierung geringere Werte als die alte Anlage aufweist. Eine Verbesserung in den Betriebskosten nach Einführung der Optimierungsmaßnahmen ist ebenfalls deutlich zu erkennen. Bei den Betriebskosten in €/kg BSB₅ ergibt sich gegenüber der alten Anlage eine Einsparung von ca. 35 000 € /Jahr (24%) und durch die Einführung der Optimierungsmaßnahmen im Jahr 2006 von ca. 25 000 € /Jahr (17%) und das trotz höherer Schmutzfrachtbelastung und höheren Eliminationsraten. Da einige Optimierungsmaßnahmen erst im Jahr 2007 eingeführt wurden, werden noch größere Einsparungen erwartet.

Tabelle 4: Optimierungspotential für die ZKA Spenge bezogen auf die Eliminationsraten und Betriebskosten

Frachten Jahresmittelwerte*	N _{ges}	NO ₃	NH ₄	P _{ges}	BSB ₅	CSB	
Zulauf kg/a							
2002 Altanlage	90173	4596	60212	11752	482862	683570	
2003 Altanlage	79725	1965	61006	13016	358081	641324	
2005	98154	4525	62244	12640	390223	936057	
2006 teilloptimiert	110139	4357	68152	16186	574428	1331407	
Ablauf kg/a							
2002 Altanlage	31706	21758	3461	3025	29088	85228	
2003 Altanlage	22925	14342	4433	2823	22735	73321	
2005	7633	4393	589	1732	18953	67431	
2006 teilloptimiert	6704	3481	1006	1542	12981	64096	
Eliminationsraten in %	N _{ges}	NO ₃	NH ₄	P _{ges}	BSB ₅	CSB	
2002 Altanlage	65		94	74	94	88	
2003 Altanlage	71		93	78	94	89	
2005	92		99	86	95	93	
2006 teilloptimiert	94		99	90	98	95	
Bedarfsmittel aus Acron bezogen auf Jahresgesamtwerte und BSB ₅	Stromverbrauch kWh/kg BSB ₅	Schlamm naß m ³ /a	Schlamm entw. kg/kg BSB ₅	Fällmittel l/kg BSB ₅	Kalk kg/kg BSB ₅	Betriebskosten €/kg BSB ₅	
2002 Altanlage	1,309	-	3,2	0,098	0,286	0,34	
2003 Altanlage	1,218	-	3,5	0,102	0,293	0,35	
2005	1,162	33052	3,3	0,090	0,191	0,32	
2006 teilloptimiert	1,161	25198	2,2	0,088	0,355	0,27	
* MW berechnet aus 24-Mischprobe/Woche vom Klärw erkspersonal geschätzt						Differenz = (MW aus 2002 und 2003) - (2006 teilloptimiert)	0,07
DIC/RS-SBR-Anlage						Differenz = 2005 - 2006 teilloptimiert	0,05
						Mittlere Jahreskosten bei gemittelter BSB-Jahresfracht €/a	144019
						Ersparnis bei gemittelter BSB-Jahresfracht €/a	34690
						Ersparnis bei gemittelter BSB-Jahresfracht €/a	24587

Auch wenn aus technischen Gründen Strategien zur erhöhten Mischwasserbeschickung noch nicht umgesetzt wurden, so zeigt die gute Übereinstimmung von Simulation und großtechnischer Umsetzung für den IST-Zustand, dass die in der Simulation ermittelten Strategien für erhöhte Mischwasserbeschickung große Erfolgsaussichten aufweisen.

Fazit und Ausblick

In diesem Forschungsvorhaben konnte beeindruckend das große Potential von integrierten, dynamischen Simulationen dargelegt werden. Durch dynamische Simulationen wird vermieden, dass es im Rahmen von Versuchen in der Großtechnik zu Gewässerbeeinträchtigungen kommen kann. Darüber hinaus wären mit der Durchführung halb- oder großtechnischer Versuche zur Erlangung vergleichbarer Erkenntnisse erhebliche Kosten verbunden. Aufgrund der statistischen Aussagekraft über die Wirkung müssen großtechnische Versuche auch über einen langen Zeitraum beobachtet werden. So können mit Hilfe der Simulation vor der großtechnischen Umsetzung sehr viele Optimierungsstrategien unter gleichen Bedingungen kostengünstig und ohne Gefahr für das Gewässer am Computer getestet werden. So wirkten sich die mit Hilfe der Simulation erarbeiteten Optimierungsstrategien auf der ZKA Spenge positiv auf die Eliminationsraten aus, wodurch die Gewässer zukünftig stärker geschützt werden. Zudem führten diese

Maßnahmen zur Senkung der Stromkosten, der Schlamm- und der Fällmittelmengen, aus Klimaschutzgründen ein wertvoller Beitrag zur Senkung der CO₂-Emission.

Des Weiteren konnte bei der integrierten Betrachtung gezeigt werden, dass SBR-Anlagen mit Hilfe einer geeigneten Steuer- und Regeltechnik durchaus in der Lage sind gesteigerte Zulaufmengen im Fall Spenge von ca. 250 l/s, das entspricht einem $f_{S,QM}$ von rund 11, problemlos zu verarbeiten. Außerdem weisen SBR-Anlagen sehr gute Reinigungsleistungen auf, die in der Regel besser sind als bei konventionellen Anlagen. Auch bezüglich der Betriebskosten stellen SBR-Anlagen eine lohnende Alternative zu Durchlaufanlagen dar.