

Bericht DBU-Projekt Phase 2

Entwicklung eines integrierten Steuerungs- und Betriebsverfahrens für die Teilsysteme Kanalnetz und Kläranlage zur deutlichen Reduzierung der Gewässerbelastung

Abschlussbericht Phase II

AZ 21372 / 02

Fördermittelgeber: Deutsche Bundesstiftung Umwelt
Postfach 1705
49007 Osnabrück

Antragsteller: Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie GmbH
Engelbosteler Damm 22, 30167 Hannover, Tel: 0511-97193-0
Niederlassung Dresden, Sudhausweg 1, Tel. 0351-82649-0
Ansprechpartner: Dr.-Ing. Lothar Fuchs; Dr.-Ing. Katja Seggelke
l.fuchs@itwh.de; k.seggelke@itwh.de

Kooperationspartner: TU Dresden, Institut für Siedlungs- und Industrierwasserwirtschaft
01062 Dresden, Tel: 0351-46335257
Ansprechpartner: Prof. Dr. Peter Krebs, Dr.-Ing. Jens Tränckner
peter.krebs@tu-dresden.de; jens.traenckner@tu-dresden.de

Dieses Dokument enthält vertrauliche Daten und Informationen.



Bericht DBU-Projekt Phase 2

Bericht DBU-Projekt Phase 2

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	1
1.1	Stand der Wissenschaft der integrierten Bewirtschaftung von Kanalnetz und Kläranlage	1
1.2	Zielsetzung im DBU-Forschungsprojekt AZ 21372	3
1.3	Inhalte des Abschlussberichts der Projekt-Phase 2.....	4
2	ENTWÄSSERUNGSSYSTEM CHEMNITZ.....	5
2.1	Allgemeine Informationen zum Einzugsgebiet	5
2.2	Kanalnetz Chemnitz	5
2.3	Kläranlage Chemnitz-Heinersdorf.....	9
2.3.1	Allgemeine Beschreibung	9
2.3.2	Mittlere Betriebskenndaten	14
3	MODELLTECHNISCHE ABBILDUNG UND UNTERSUCHUNG DES EINZUGSGEBIETS CHEMNITZ.....	17
3.1	Kanalnetzmodell.....	17
3.1.1	Allgemeine Beschreibung	17
3.1.2	Kalibrierung und Modellgüte	18
3.2	Kläranlagenmodell	20
3.2.1	Stand aus Projektphase 1, Vorgehen in Phase 2.....	20
3.2.2	Transport- und Umsatz-Prozesse in der Vorklärung	20
3.2.3	CSB-Fraktionierung.....	24
3.2.4	Kalibrierung der biologischen Prozesse	25
3.2.5	Absetzprozesse im 1d-NK-Modell.....	26
3.2.6	Realitätsnahe Abbildung der Regelkreise.....	29
3.3	Gesamtmodell	31
3.3.1	Kopplung der Modelle	31
3.3.2	Nachkalibrierung des Gesamtmodells	33
3.3.3	Modellgüte, Fehler und Unsicherheiten des Gesamtmodells.....	33
3.4	Simulative Lastfallstudie	38
3.4.1	Ziele und Vorgehensweise.....	38
3.4.2	Ausgewählte Regenereignisse	38
3.4.3	Ergebnisse	40

Bericht DBU-Projekt Phase 2

4	BELASTUNGSGRENZEN DER KLÄRANLAGE CHEMNITZ-HEINERSDORF IM HINBLICK AUF DEN MISCHWASSERZUFLUSS	41
4.1	Bearbeitungskonzept	41
4.2	Untersuchung bautechnischer Limitierungen	41
4.2.1	Datengrundlagen	41
4.2.2	Becken, Verteiler- und Verbindungsbauwerke	41
4.2.3	Pumpen	43
4.2.4	Belüftungskapazität	45
4.2.5	Generelle Probleme im Zulaufbereich der KA	46
4.3	Verhalten der Stickstoffelimination bei Mischwasser	47
4.3.1	Nitrifikation	47
4.3.2	Denitrifikation	49
4.3.3	Gesamter Stickstoff (NH ₄ -N und NO ₃ -N) im Ablauf der Kläranlage	50
4.4	Verhalten der Nachklärung bei Mischwasserzufluss	52
4.4.1	Möglichkeiten zur messtechnischen Erfassung	52
4.4.2	Auswirkung von Mischwasserereignissen auf die Feststoffparameter	53
4.4.3	Analyse der Ursachen	55
4.4.4	Statistische Auswertung	63
4.5	P-Elimination	65
4.6	Fazit	66
5	ENTWURF DES FUZZYBASIERTEN REGELUNGSKONZEPTES.....	67
5.1	Grundlagen der Fuzzy-Regelung	67
5.2	Potentielle Störgrößen für die Regelung des Zuflusses zur Kläranlage	69
5.2.1	Übersicht und Erläuterung der Störgrößen	69
5.2.2	Störgrößen durch Prognose der Stickstoffablaufwerte	73
5.2.3	Störgröße durch Prognose einer NH ₄ -N-Fracht-Spitze	78
5.2.4	Hinweise zur Ermittlung der Bereichsgrenzen	81
5.3	Erstelltes Fuzzy-Regelungskonzept für das System in Chemnitz	84
5.3.1	Übersicht über die Regelbasis	84
5.3.2	Festlegung der Bereichsgrenzen	87
5.4	Simulative Erprobung und Optimierung des Reglers	89
5.5	Automatisierte Plausibilitätskontrolle der messtechnisch erfassten Störgrößen und Ersatzwertkonzepte.....	91

Bericht DBU-Projekt Phase 2

6	GROßTECHNISCHE ANWENDUNG AUF DER KA CHEMNITZ.....	95
6.1	Zeitraumen und Vorgehensweise	95
6.2	Installation vor Ort	96
6.3	Ergebnisse der großtechnischen Versuche	98
6.3.1	Übersicht über den Versuchszeitraum.....	98
6.3.2	Auswertung der Mischwasserereignisse mit Reglereingriff.....	100
6.3.3	Bilanzierung der Frachten	108
6.4	Sonstige praktische Aspekte	111
7	ÜBERTRAGBARKEIT AUF ANDERE GEBIETE	113
7.1	Allgemeine Hinweise.....	113
7.2	Erforderliche Arbeitsschritte.....	114
8	ZUSAMMENFASSUNG.....	117
9	LITERATUR	123
10	ANHANG	127
10.1	Modell-Detaills KA Chemnitz	127
10.2	Details zum Regelungskonzept	131

Bericht DBU-Projekt Phase 2

VERZEICHNIS DER BILDER

Bild 1.1	Konventionelles Mischsystem mit $Q_m = 2 \cdot Q_s + Q_f$	2
Bild 2.1	Zulaufbereich KA Chemnitz-Heinersdorf	6
Bild 2.2	Querschnitt eines der beiden Zulaufgerinne	6
Bild 2.3	Prinzipskizze der Kläranlage Chemnitz-Heinersdorf	10
Bild 2.4	Luftbild der KA Chemnitz (Quelle: Google Earth)	11
Bild 3.1	Standorte der Regenschreiber im Einzugsgebiet Chemnitz	18
Bild 3.2	Vergleich der gemessenen und simulierten Durchflussganglinien mit einem und mit drei Regenschreibern (RS)	19
Bild 3.3	Vergleich der gemessenen und simulierten Abflüsse (KA und RÜB)	19
Bild 3.4	Simulation der CSB-Ganglinie am Ablauf Vorklärung, Ereignis 18.03.07	22
Bild 3.5	TKN/NH ₄ -N- Verhältnis im Zulauf Vorklärung, Ergebnis der durchgeführten Sondermessungen	23
Bild 3.6	Dynamischer, inerter CSB-Anteil α_{XI} in Abhängigkeit von Q_{zu} .	24
Bild 3.7	NH ₄ -N-Konzentration im Ablauf Belebung – simuliert und gemessen	25
Bild 3.8	Vergleich simuliert und gemessen im Ablauf Nachklärung	26
Bild 3.9	Links: Berechnung der Sinkgeschwindigkeit v_0 als Funktion des ISV Rechts: Absatzparameter r_h in Abhängigkeit des ISV (nach Härtel, 1990).	27
Bild 3.10	Resultierende Sinkgeschwindigkeit v_s nach Takács et al. (1991) für verschiedene ISV.	27
Bild 3.11	CSB-Ablauf Nachklärung Modell und Messwert	28
Bild 3.12	Vergleich des simulierten Schlammspiegelniveaus mit konstanten und variablen ISV als gleitende Mittelwerte über 2 Tage (OF-Modell).	29
Bild 3.13	Interne Rezirkulation bei Trocken- und Regenwetterbetrieb.	30
Bild 3.14	Rücklaufschlamm bei Trocken- und Regenwetterbetrieb.	30
Bild 3.15	Kopplung Hystem-Extran-Güte und Simba via itwhControl	31
Bild 3.16	Übergabe der Parameter von Simba an Control	32
Bild 3.17	Vergleich der gemessenen und simulierten Konzentrationsganglinien	34
Bild 3.18	Stickstoffkonzentrationen im Kläranlagenablauf: Mess- und Simulationsergebnisse des gekoppelten Gesamtmodells	34
Bild 3.19	Konzentrationen partikulärer Stoffe im Kläranlagenablauf: Mess- und	

Bericht DBU-Projekt Phase 2

	Simulationsergebnisse des gekoppelten Gesamtmodells	35
Bild 3.20	Simulation (Otterpohl-Freund (Sim) und Takács (SimT)) und Messung der Schlammspiegelhöhe	36
Bild 3.21	KA-Zufluss und Entlastung aus RÜB an der KA, Regen 009 und 013	39
Bild 3.22	NH ₄ -N-Frachten ins Gewässer für Ereignisse in 2004, Gegenüberstellung der Lastfälle (itwh, ISI, 2006)	40
Bild 4.1	Links: $Q_{M,max}$ als Funktion von TKN_{ZB} und NO_3-N_{AB} bei max. möglichen Q_{RS} und Q_{Rezi} . Rechts: Häufigkeit des gleichzeitigen Auftretens kritisch hoher TKN-Zu- und Nitrat-Ablaufkonzentrationen	45
Bild 4.2	Häufigkeitsverteilungen des Luftbedarfs (Nov. 2005 – Dez. 2006)	45
Bild 4.3	Gruppierung der NH ₄ -N-Konzentrationen im Ablauf der Kläranlage	47
Bild 4.4	Ereignis mit relativ hohen NH ₄ -N-Konzentration im AN	48
Bild 4.5	Gegenüberstellende Auswertung des NH ₄ -N im Ablauf der Belebung und der Nachklärung	49
Bild 4.6	Hoher N-Gehalt im Ablauf bei Mischwasser (max. 15,4mg/L)	51
Bild 4.7	Störung des Absetzverhaltens, Regenereignis 17.2.06 (Ereignis 048)	54
Bild 4.8	Störung des Absetzverhaltens, 9.-13.3.06 (Ereignis 054)	54
Bild 4.9	Verhalten von q_{sv} , Trübung und dem partikulären P-Anteil ($P_{gesAN} - PO_4 - P_{ZNK}$) im Zeitraum Sep. 2005 bis 2006	56
Bild 4.10	Korrelation der Tagesmittelwerte von q_{sv} und Trübung (Zeitraum Sep. 2005 bis Dez. 2006)	56
Bild 4.11	Ganglinien von VSV, ISV, $Trübung_{AN}$ und $P_{part,AN}$	57
Bild 4.12	Schlammströme im Belebungsverfahren	58
Bild 4.13	Mischwasser-Ereignis 9.-14.3.2006 (ab 12.3. ISV 122)	60
Bild 4.14	Mischwasser-Ereignis 16.6.2006	61
Bild 4.15	Variantenrechnung von Q_{RS} , Ereignis 9./10.3.2006	62
Bild 4.16	P-Fällung bei einem Mischwasserereignis	65
Bild 5.1	Vereinfachte Darstellung der Arbeitsweise des Regelinterpreters	67
Bild 5.2	links: Fuzzy-Sets für die linguistische Variable CSB_{AN} rechts: Zugehörigkeitsfunktion für das Regelement $Q_{M,KA}$	68
Bild 5.3	Prognostizierte und gemessene NH ₄ -N-Konzentration, Ablauf BB	75
Bild 5.4	Prognostizierte und gemessene NO ₃ -N-Konz., Ablauf Belebung	76

Bericht DBU-Projekt Phase 2

Bild 5.5	Schiebersteuerung	77
Bild 5.6	Wirkung der prognostischen Zuflussregelung auf die Ammonium- ablaufkonzentration	77
Bild 5.7	Messwerte von Abfluss, $\text{NH}_4\text{-N}$ Konzentrations- und Frachtganglinie der KA Chemnitz	79
Bild 5.8	Vergleich von gemessener und mittels Gleichung 20 prognostizierter Frachtspitze	80
Bild 5.9	Bereichsgrenzen am Beispiel $\text{NH}_4\text{-N}_{\text{AN}}$ und die dann gültigen Regeln	82
Bild 5.10	Resultierender maximaler Zufluss zur KA bei MW	83
Bild 5.11	Skizze des integrierten Steuerungssystems	84
Bild 5.12	Zugehörigkeitsfunktionen für das Messelement P_{ges}	88
Bild 5.13	Ereignis 009-013, Gegenüberstellung der Lastfälle Q_Z : IST (9.450 m^3/h), MAX (11.000 m^3/h), RTC (geregelt bis 11.000 m^3/h)	89
Bild 5.14	Ereignis 011, Gegenüberstellung der Lastfälle für Q_Z	90
Bild 5.15	Aktive Regeln in Ereignis 011	91
Bild 5.16	Vergleich der mittleren TS-Gehalt vor und nach einer Korrektur	94
Bild 6.1	Anbindung des Reglers an das Leitsystem der KA Chemnitz	96
Bild 6.2	Sollwertvorgabe auf dem Monitor des in Chemnitz installierten PC	97
Bild 6.3	Übersicht über die Versuchsphase: Mai-Anfang Juni	98
Bild 6.4	Übersicht über die Versuchsphase: Mitte Juni bis Ende August	99
Bild 6.5	Ereignis 16 (15.8.08) mit Reglereingriff (1. Hälfte)	102
Bild 6.6	Ereignis 16, Abflüsse und Situation am RÜB	102
Bild 6.7	Ereignis 16, Verhalten der Konzentrationen im Zulauf	103
Bild 6.8	Ereignis 17 mit Reglereingriff, 19.8.08	104
Bild 6.9	$\text{PO}_4\text{-P}$ - Frachten und Fällmitteldosierung (Ereignis 17)	105
Bild 6.10	Ereignis 18 mit Reglereingriff, 24.8.08	106
Bild 6.11	Situation am RDLB (RÜB), Ereignis 18	107
Bild 6.12	Messstellen zur Bilanzierung der Ereignisse	108
Bild 6.13	$\text{NH}_4\text{-N}$ -Frachtbilanz (Ereignisse 1-7)	110
Bild 6.14	$\text{NH}_4\text{-N}$ -Frachtbilanz (Ereignisse 9-18)	110
Bild 6.15	Reduzierung der Frachten bei den Ereignissen im Versuchszeitraum	111

Bericht DBU-Projekt Phase 2

Bild 7.1	Erforderliches Bearbeitungskonzept	114
Bild 10.1	Kopplungsbaustein in SIMBA	130

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AN	Ablauf Nachklärung
BB	Belebungsbecken
BÜ	Beckenüberlauf
C	Konzentration
KÜ	Klärüberlauf
MC	Messcontainer auf der KA Chemnitz
MW	Mischwasser
OF	Nachklärbeckenmodell nach Otterpohl-Freund
q_A	Oberflächenbeschickung
q_{sv}	Schlammvolumenbeschickung
RS	Rücklaufschlamm
RÜB	Regenüberlaufbecken
RW	Regenwetter
SSpg	Schlammspiegelhöhe
TW	Trockenwetter
Z	Zulauf KA
ZB	Zulauf Belebung
VSV	Vergleichsschlammvolumen

1 Einleitung

1.1 Stand der Wissenschaft der integrierten Bewirtschaftung von Kanalnetz und Kläranlage

Bereits Ende der 80-er Jahre wurde mit integralen, stoffstromorientierten Modellen deutlich, dass aus den Mischwasserentlastungen sehr hohe Emissionen in die Gewässer gelangen und diese stark belasten können. Untersuchungen zeigten, dass zu möglichst niedrigen Emissionen nicht nur der Bau von Speichervolumen oder anderen Maßnahmen unmittelbar im Kanalnetz beitragen können, sondern auch die Mischwasserbehandlung auf der Kläranlage (z.B. Durchschlag, 1990). Der Betrieb von Kanalnetz und Kläranlage soll an Ihrer gemeinsamen Schnittstelle besser aufeinander abgestimmt, d.h. integriert werden (Lijklema et al., 1993; ATV, 1997). Auch hinsichtlich der Kläranlage wurden von Krauth & Schwentner (1994) bereits 1994 ähnliche Wünsche formuliert, um mittels einer variablen, an die momentane Belastbarkeit angepassten Beschickung der Kläranlage bei Regen, Über- und Unterbelastungen des Reinigungspotentials zu vermeiden.

Bis heute wurden zahlreiche weitere Untersuchungen durchgeführt, die inzwischen auf detaillierten Modellen sowie auf komplexen Messprogrammen basieren. Auch hieraus folgte, dass ein wesentlicher Anteil der akuten Gewässerbelastung aus Mischwasserentlastungen resultiert, die durch optimierte Mischwasserzuflüsse zur Kläranlage reduziert werden können (z.B. Alex et al, 1999, Willems et al., 1999, Bode et al., 2002, Erbe et al., 2002, Seggelke, 2002, Meirlaen et al, 2002).

Detaillierte Untersuchungen der Kläranlage bestätigen, dass auch gesteigerte Zuflüsse nicht zwangsläufig zu einem Versagen der Reinigungsleistung führen. Häufig sind Kapazitäten vorhanden bzw. können durch intelligente Regelungen geschaffen werden. Die kritischen Prozesse im „Lastfall Mischwasser“ sind bekannt, es handelt sich zumeist um die Nitrifikation und die Nachklärung (z.B. Harremoës et al., 1993; ATV, 1997; Bruns, 1999; Seggelke, 2002).

Trotz bisheriger Erkenntnisse erfolgte in der Praxis bis 2003 üblicherweise eine separate Bemessung der Teilsysteme mit der Zielgröße Emission, bei der der Kläranlagenzufluss Q_m bei Regen auf einen festen Wert nach ATV A131 (1991) und ATV A128 (1992) von „in der Regel“ auf $Q_m = 2 \cdot Q_s + Q_f$ begrenzt war (Bild 1.1).

Seit 2003 ist durch das ATV-DVWK Arbeitsblatt A198 (2003) zumindest formal ein gewisser Handlungsspielraum bei der Bemessung vorhanden. Der Mischwasserzufluss $Q_M = f_{Sp,S} \cdot Q_{S,aM} + Q_{F,pM}$ (l/s) wird darin als Bandbreite (z.B. $f_{Sp,S} = 3-6$ für EZG > 100.000 E) vorgegeben, die eine Berücksichtigung der jeweiligen Einzugsgebiets- und Kläranlagencharakteristika zulässt (vgl. Seggelke & Rosenwinkel, 2004). Eine wesentli-

Bericht DBU-Projekt Phase 2

che Randbedingung für die Optimierung des maximalen Kläranlagenzuflusses bei Mischwasser ist somit gegeben.

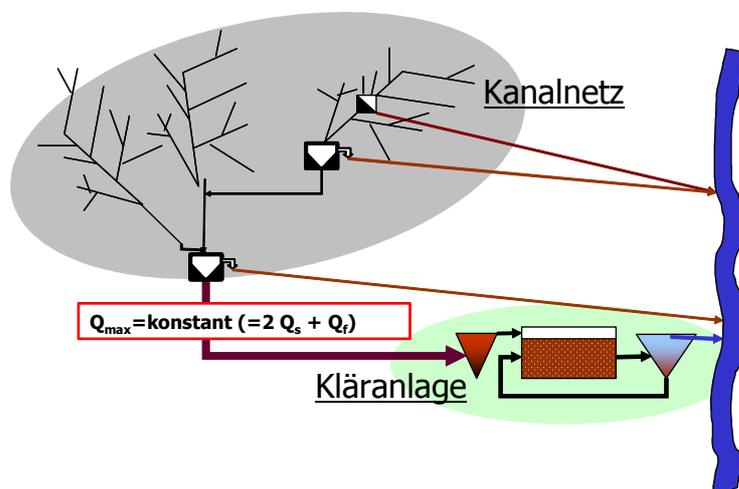


Bild 1.1 Konventionelles Mischsystem mit $Q_m = 2 \cdot Q_s + Q_f$

Referenzprojekte müssen nun zeigen, ob neben dieser statischen Optimierung des Systems durch den idealen Mischwasserzufluss, die in jedem Fall für planende Büros Pflicht sein sollte, auch eine dynamische, d.h. geregelte, Anpassung des Zuflusses $f_{sp,s}$ im Bereich von 3 bis 6 möglich ist.

Grundsätzlich ist es für die Regelung des Zuflusses zur Kläranlage wichtig, ein Konzept zu entwickeln, das die aktuelle Leistungsfähigkeit der Kläranlage überwachen und die Betriebssicherheit bzw. die Einhaltung der Überwachungswerte gewährleisten kann (Seggelke, 2002). Ist ein Konzept entwickelt, können gegebenenfalls folgende Zielsetzungen, je nach örtlich vorliegenden Randbedingungen, verfolgt werden:

- Reduktion der Gesamtemission aus Kanalnetz und Kläranlage
- Einsparung von Investitionskosten in Kanalnetz oder Kläranlage durch optimierte Nutzung vorhandener Kapazitäten im jeweils anderen Systemteil
- Reduzierung der Betriebskosten (Fällmittel, Energie) durch Drosselung auf den A198 Minimalwert im Verlauf eines Starkregens. Teilweise sind die Konzentrationen im Zufluss durch die starke Verdünnung geringer als im Kläranlagen-Ablauf!

Die parallele Verknüpfung mit einer Verbundsteuerung des Kanalnetzes wäre nach einer erfolgreichen Erprobung der Regelung des Mischwasserzuflusses der letzte Schritt im Hinblick auf eine komplette integrierte Steuerung von Kanalnetz und Kläranlage. Die Verbundsteuerung verschiedener Steuereinrichtungen (Schieber, Wehre etc.)

Bericht DBU-Projekt Phase 2

wurde in den letzten Jahren in verschiedenen Kanalnetzen implementiert (z.B. Dresden, Wien [Fuchs et al., 2007], Bamberg). Der Betrieb ist zuverlässig und besticht durch die Nutzung vorhandener Kanalnetzvolumina als Stauraum anstelle von Speichervolumen in Form von zu bauenden Becken. Insbesondere besteht durch dieses flexible Konzept eine Möglichkeit, um auf veränderte Bedingungen durch Klimawandel oder durch demografischen Wandel flexibel reagieren zu können (Krebs, 2008).

1.2 Zielsetzung im DBU-Forschungsprojekt AZ 21372

Die integrierte Steuerung von Kanalnetz und Kläranlage, die eine dynamische Einstellung des Mischwasserzuflusses zur Kläranlage je nach Randbedingungen und Kapazitäten ermöglicht, muss durch Praxisanwendungen seinen Nutzen und seine Tauglichkeit unter Beweis stellen.

Vor diesem Hintergrund wurde vom Institut für technisch wissenschaftliche Hydrologie GmbH (itwh) als Antragsteller und dem Institut für Siedlungs- und Industrieresourcennutzung (TU Dresden) als Kooperationspartner das von der DBU geförderte Forschungsprojekt „Entwicklung eines integrierten Steuerungs- und Betriebsverfahrens für die Teilsysteme Kanalnetz und Kläranlage zur deutlichen Reduzierung der Gewässerbelastung“ bearbeitet. Gesamtziel war die Entwicklung eines Regelungskonzepts sowie die großtechnische Erprobung einer integrierten Steuerung.

In der Projektphase 1 des DBU-Projektes zur integrierten Steuerung wurden im Jahr 2005 zunächst Voruntersuchungen durchgeführt.

Nach Auswahl geeigneter Kläranlagen wurden Datenauswertungen zum Einfluss des Mischwassers auf Kläranlagen durchgeführt. Am Beispiel des EZG Chemnitz wurden neben detaillierten Auswertungen Modelle erstellt und mittels eines kalibrierten Gesamtmodells von Kanalnetz und Kläranlage anhand realer Regenereignisse eine simulative Fallstudie durchgeführt (itwh, ISI, 2006). Es wurde ein auf Fuzzy-Logik basierendes Regelungskonzept erstellt und simulativ erfolgreich erprobt.

Das erhebliche Potential wurde deutlich: Eine Reduzierung der Fracht in das Gewässer um bis zu 25% ist möglich. Insbesondere bei den statistisch häufiger vorkommenden, schwächeren Regenereignissen führten Höherbelastungen der in vielen Fällen freie Kapazitäten aufweisenden Kläranlage zu einer deutlichen Reduzierung der Gesamtemission und insbesondere der akuten Gewässerbelastung durch Mischwasserentlastungen.

Aus den Ergebnissen der 1. Projektphase wurde deutlich, dass eine Weiterführung der Untersuchungen Ziel führend und vielversprechend ist, so dass die zweite Phase bewilligt wurde.

Bericht DBU-Projekt Phase 2

1.3 Inhalte des Abschlussberichts der Projekt-Phase 2

Im vorliegenden Abschlussbericht der Projekt-Phase 2 sind die Ergebnisse der Untersuchungen zusammengefasst.

Nachdem in Kapitel 2 zunächst das Entwässerungssystem vorgestellt wird, erfolgt die Erläuterung dessen modelltechnischer, integrierter Abbildung in Kap. 3. Gegenüber der Projektphase 1 wurden die Modelle präzisiert (ungleichmäßige Überregnung, Nachkalibrierung der Modelle Vorklärung, Nachklärung, Biologie) und eine weitere Lastfallstudie an sechs Regenereignissen 2006 durchgeführt, in der bei vier Ereignissen in der Kläranlage Probleme auftraten. Die Modelle müssen im Hinblick auf den simulativen Reglerentwurf auch diese Extremfälle und Belastungsgrenzen abbilden können. Ähnlich wie in Projektphase 1 werden die Lastfälle „IST-Zustand“, „erhöhter maximaler Mischwasserzufluss“ und „geregelter Mischwasserzufluss“ gerechnet und verglichen.

In Kap. 4 werden die Untersuchungen der Belastungsgrenzen der Kläranlage bei Mischwasserzuflüssen aufgezeigt. Neben den bautechnischen Limitierungen werden die einzelnen Reinigungsprozesse anhand von Messdaten hinsichtlich eines maximal möglichen Zuflusses untersucht. Parallel werden Parameter identifiziert, die Hinweise auf Störungen aufzeigen und somit als Störgrößen im Regelungskonzept fungieren können.

Kapitel 5 zeigt den Entwurf des fuzzybasierten Regelungskonzepts. Neben den Grundlagen der Fuzzy-Regelung werden potentielle Störgrößen aufgeführt und das für Chemnitz konzipierte Konzept, die Regelmatrix und die gewählten Störgrößenbereiche erläutert. Die Erprobung und Weiterentwicklung erfolgte simulativ mittels des integrierten Modells.

In Kapitel 6 werden die Ergebnisse der großtechnischen Versuchsphase auf der KA Chemnitz sowie die dafür erforderliche Installation vor Ort vorgestellt. Zur Beurteilung der Versuchsphase werden Frachtbilanzen der Messdaten herangezogen.

Um eine Übertragbarkeit auf andere Einzugsgebiete und Systeme zu ermöglichen, werden die im Rahmen der Untersuchungen erzielten Erkenntnisse bezüglich der erforderlichen Arbeitsschritte zusammengestellt. Es werden weiterhin grundlegende Hinweise zu den Möglichkeiten des Konzeptentwurfes sowie zu den Anforderungen an die Mess- und Regelungstechnik gegeben (Kap. 7).

2 Entwässerungssystem Chemnitz

Nachfolgend sind nur die für die Projektbearbeitung in Phase 2 direkt relevanten Informationen über das Einzugsgebiet, die Kläranlage und das Kanalnetz zusammengestellt. Weitere Details sind dem Abschlussbericht der 1. Projektphase zu entnehmen (itwh, ISI, 2006).

2.1 Allgemeine Informationen zum Einzugsgebiet

Die Stadt Chemnitz wird im Wesentlichen im Mischsystem entwässert (A_{red} ca. 2.000 ha) und das Abwasser in der Kläranlage Chemnitz-Heinersdorf behandelt. Im Trennsystem werden insbesondere die neueren großen Gewerbegebiete und kleineren Wohngebiete entwässert. Derzeit sind ca. 240.000 E bzw. inklusive industriellen Großeinleitern 360.000 EW an die Kläranlage angeschlossen.

12 Teileinzugsgebiete werden vorwiegend im Freigefälle in zwei parallel zur Chemnitz verlaufende Hauptsammler entwässert. Nur kleine Gebiete sind mittels Druckrohrleitung direkt an die Kläranlage bzw. ans Netz angeschlossen. Weiterhin werden 5 kleinere Gewässer im Mischsystem zur Kläranlage geleitet (\sum MQ 78 l/s)

2.2 Kanalnetz Chemnitz

Insgesamt sind derzeit im Mischsystem (650 km von insgesamt 1089 km Länge) 104 Regenüberläufe und 19 Anlagen mit Speichervolumen vorhanden. Die Entlastung erfolgt in die Vorfluter Chemnitz, Bahrebach, Pleißenbach, Kappelbach und weitere Nebengewässer.

Es stehen 13.600 m³ (Stand 2006) Speichervolumen zur Verfügung. Nach der Schmutzfrachtberechnung von 2006 sind weitere 17.100 m³, schwerpunktmäßig im Hauptsammlersystem, geplant. Der Nachweis erfolgte nach ATV - A128 inkl. einer Kontrolle des festgelegten Grenzwertes der spezifischen jährlichen Entlastungsfracht von 250 kg CSB/(ha_{red}·*a)

Bild 2.1 zeigt das Regenüberlaufbecken im Zulaufbereich der Kläranlage Heinersdorf (Durchlaufbecken im Nebenschluss, 5.850 m³).

Bericht DBU-Projekt Phase 2

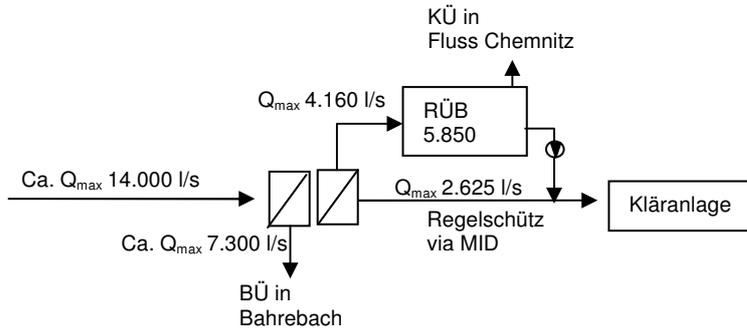


Bild 2.1 Zulaufbereich KA Chemnitz-Heinersdorf

Im Zulaufbereich der Kläranlage wird ein Regelschütz (Planfeststellung: max. 9.450 m³/h) via 2 MIDs geregelt (s. Tab. 2.1). Dieses ist relativ träge, so dass es kurzfristig zu Zuflussspitzen kommen kann.

Tab. 2.1 Regelkonzept des Zuflussschiebers

	WENN	DANN
Regel 1	$Q_{zu} < Q_{max} - 1000 \text{ m}^3/\text{h}$ ODER Schieberstellung $> 29\%$	h-Schieber = h-Wasserspiegel + 5cm
Regel 2	$Q_{zu} > Q_{max} - 200 \text{ m}^3/\text{h}$ ODER $\Delta h\text{-Wasserspiegel} > 20 \text{ cm}$ innerhalb von 3 min.	Regelung nach maximal zulässigem Zufluss

Der Regelschieber bildet mit den Durchflussmessungen im Zulauf einen geschlossenen Regelkreis (PI-Struktur). Die Regelung auf die Wasserspiegellage bei Trockenwetter soll die Totzeit bei einem erforderlichen Regeleingriff minimieren. Die Stellgeschwindigkeit des Schiebers wurde durch Handmessungen mit ca. 7,9 cm/min. bestimmt. Bild 2.2 zeigt die Abmessungen des Zulaufgerinnes.

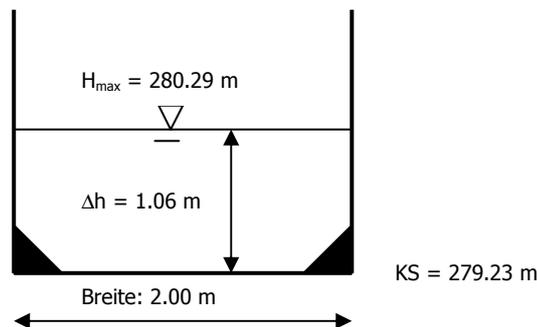


Bild 2.2 Querschnitt eines der beiden Zulaufgerinne

Bericht DBU-Projekt Phase 2

Messungen im Kanalnetz Chemnitz

Im Kanalnetz sind weder Wasserstands- noch Durchflussmessgeräte vorhanden. Der Abfluss und die Stoffkonzentrationen werden nur im Zulauf der Kläranlage gemessen.

Das Regenüberlaufbecken im Bereich der Kläranlage wird messtechnisch erfasst. Neben den Entlastungsabflüssen aus dem Klär- und dem Beckenüberlauf werden bei Entlastungsereignissen Konzentrationsmessungen durchgeführt (Mischprobe KÜ, Stichprobe BÜ).

Im Stadtgebiet Chemnitz wird derzeit nur ein Niederschlagsmessgerät vom DWD betrieben (Standort: süd-westlicher Stadtrand), dessen Daten im Rahmen des Projektes erworben wurden. Eine privat betriebene Messstation befindet sich im Ortsteil Einsiedel. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden temporär zwei Niederschlagsmessgeräte installiert (Gelände Kläranlage; im Bereich der Stadtmitte (RÜB Kapplerdrehe), deren Daten im Zeitintervall von 5 Minuten als Summenwerte erfasst wurden.

Tab. 2.2 Regenmessungen (DWD und temporär im DBU-Projekt)

Messstelle	Parameter	Raster	Messzeitraum	Sonstiges
Regenmesser Chemnitz (DWD)	Niederschlag	10 min	01.01.2004 - 31.12.2004 01.09.2005 – 31.10.2006	
Regenmesser ZKA (DBU)	Niederschlag	5 min	28.07.2005 - 10.11.2006	
Regenmesser Kapplerdrehe (DBU)	Niederschlag	5 min	28.07.2005 - 10.11.2006	häufig Ausfall

Wesentliche Kennwerte aus den Messungen

Aus den Zufluss-Messdaten zur Kläranlage (Jahr 2004) wurden die einwohnerspezifischen Informationen zum Abwasseranfall bei Trockenwetter ermittelt und für die Modellkalibrierung des hydrodynamischen Schmutzfrachtmodells Hystem-Extran-Güte eingesetzt (s. Kap.3.1). Anhand der Messdaten aus 2005 und 2006 wurden diese Ergebnisse verifiziert.

2004 beträgt der **mittlere Trockenwetterabfluss** 732 l/s (2004). Für den Verifikationszeitraum September 2005 bis Oktober 2006 ergibt sich ein mittlerer Trockenwetterabfluss von 713 l/s. Der **Fremdwasserzuschlag** schwankt stark in Abhängigkeit der Jahreszeit (ca. 320 bis 750 l/s, \varnothing 402 l/s = 122%). Ganglinien und sonstige Kennwerte sind im Bericht der 1. Projektphase dargestellt.

Die Messdaten im Zulaufbereich der Kläranlage sind für die betrachteten Zeiträume in Tab. 2.3 dargestellt. Verglichen mit üblichen Werten sind die **Konzentrationen** aufgrund des hohen Fremdwasseranteils gering.

Bericht DBU-Projekt Phase 2

Tab. 2.3 Stoffkonzentrationen im Zulauf der KA Chemnitz (24-h-Mischprobe)

	CSB [mg/l]		NH ₄ -N [mg/l]		TKN [mg/l]	
	alle	TW	alle	TW	alle	TW
Mittelwert 2004	398	479	23,1	28,8	38,4	47,6
Mittelwert 09.2005-10.2006	428	492	23,9	28,8	42,3	50,2

Der geringfügige Rückgang des TW-Abflusses im Zeitraum 2005/06 und der geringfügige Anstieg der Konzentration im Zulauf führt zu in beiden Zeiträumen in etwa gleich großen Frachten. Die Trockenwetter-Kalibrierung im Kanalnetzmodell kann daher aus dem Jahr 2004 übernommen werden.

Bericht DBU-Projekt Phase 2

2.3 Kläranlage Chemnitz-Heinersdorf

2.3.1 Allgemeine Beschreibung

Die auf 400.000 EW ausgelegte Kläranlage Chemnitz-Heinersdorf ist seit 1998 in Betrieb. Sie besteht aus folgenden Behandlungsstufen:

- Mechanische Reinigung: Rechen, Sandfang, Vorklärung (viersträßig)
- Biologische Stufe: 6 Straßen, Anaerobbecken, vorgeschaltete Denitrifikation, Nitrifikation mit feinblasiger Druckbelüftung, Rücklaufschlammdenitrifikation mit einem Teilstrom Rohabwasser (von den 6 Straßen sind überwiegend nur 5 in Betrieb).
- 4 runde, horizontal durchströmte Nachklärbecken (zuvor Vermischung der Abläufe aus den 6 Belebungsbecken im Verteilbauwerk)
- Chemische P-Fällung
- Schlammbehandlung

Der Lageplan mit der Anordnung der Messcontainer (MC) des Betreibers ist in Bild 2.3 dargestellt, die Bauwerksabmessungen sind Tab. 2.4 zu entnehmen.

Tab. 2.4 Abmessungen der wesentlichen Bauwerke

	Beschreibung	Abmessungen / Oberfläche	Volumen
Regenüberlaufbecken	3 Rechteckbecken	3 x 1950 m ³	5.850 m ³
Vorklärung	4 Rechteckbecken	4 x 1.150 m ³ ; seit 12.6. nur zwei in Betrieb tR ca. 1,25h, vorher 3 Becken	2.300 m ³
	1 RS-Deni-Becken		4000 m ³
Belebung	6 x 2 Bio-P-Becken ¹⁾	6 x 2 x (16,7 x 17 x 6,2) [in m]	21.120 m ³
Σ 100.110m ³	6 x 2 Denitrifikationsbecken	6 x 2 x (17,4 x 17 x 6,2) [in m]	22.050 m ³
	6 Nitrifikationsbecken	6 x (89,9 x 17 x 6,2) [in m]	56.840 m ³
Nachklärung Σ 42.422 m ³	4 Rundbecken (Schildräumer, Zahnschwelle) ²⁾	∅ 56 m, A = 4 x 2.463 m ² = 9.852 m ²	4 x 10.605 m ³

Anmerkung: Die Belebungsbecken sind mit 6 m verhältnismäßig tief.

¹⁾ kann auch mit 1 Kaskade weniger betrieben werden, diese dann für Deni

²⁾ An NK 1 sind die Stengeleinläufe mit Haube ausgerüstet

Gemäß Planfeststellung darf der Regenwetterzufluss 9.450 m³/h (2.625 l/s) betragen.

Bericht DBU-Projekt Phase 2

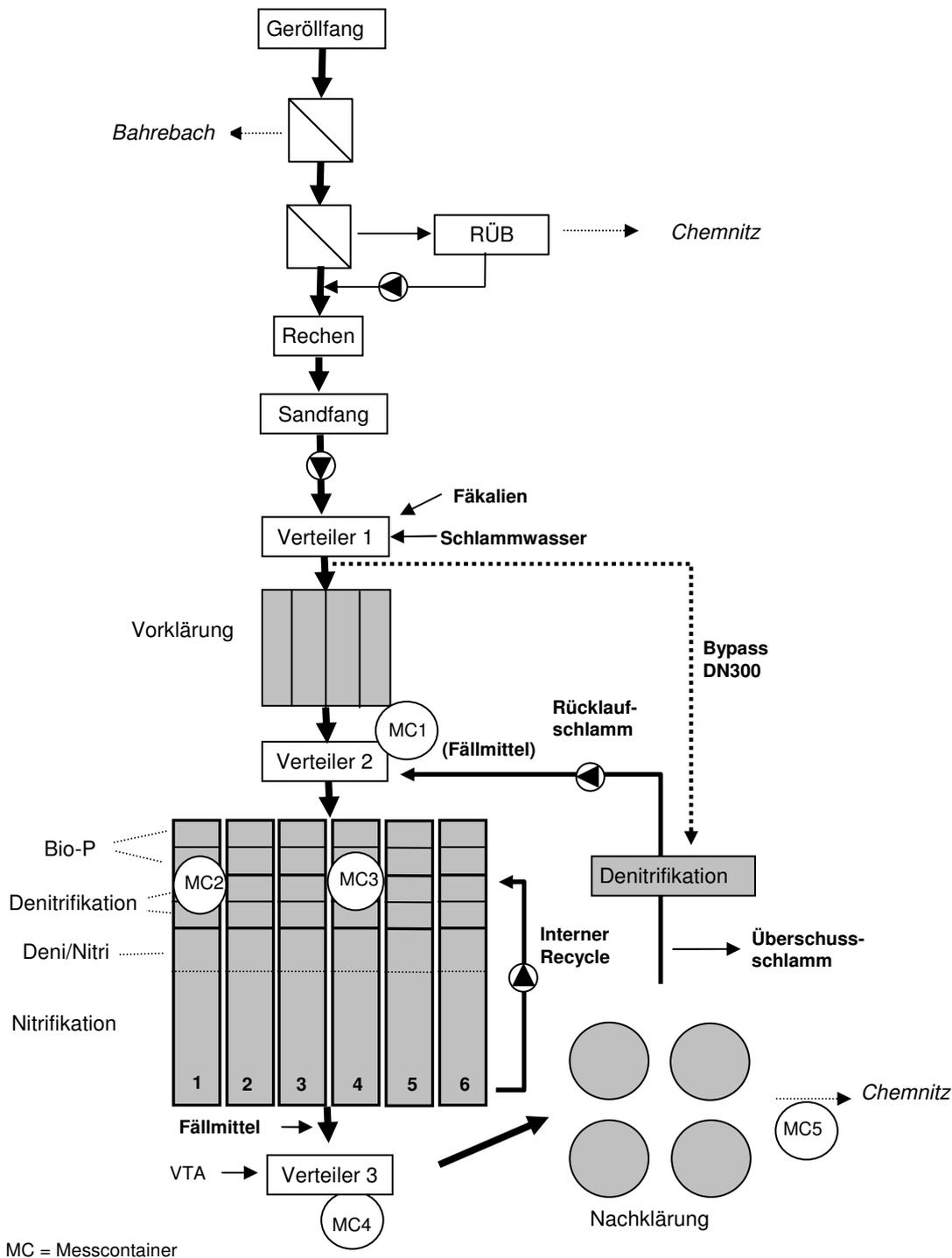


Bild 2.3 Prinzipischnes Flussdiagramm der Kläranlage Chemnitz-Heinersdorf

Bericht DBU-Projekt Phase 2

Die Überwachungswerte sind für CSB, BSB₅ und NH₄-N gegenüber den Standardanforderungen der Größenklasse GK 5 verschärft, während für den Parameter N_{ges} auf Basis eines erfolgreichen Nachweises der „70%-Elimination“ der Überwachungswert von 13 mg/L auf 16,5 mg/l angehoben wurde (vgl. Tab. 2.5).

Tab. 2.5 Aktuelle Überwachungswerte auf der ZKA Chemnitz-Heinersdorf, verglichen mit Werten der Abwasserverordnung, Größenklasse GK 5

	CSB mg/L	BSB ₅ mg/L	NH ₄ -N mg/L	N _{ges} mg/L	P _{ges} mg/L
KA Chemnitz	60	10	5	16,5	1
Abwasserverordnung GK 5	75	15	10	13	1

Erwähnenswert ist insbesondere das PC-gestützte Assistenzsystem inkl. Online-Simulation (UMOS, Fa. Optum Sytemtechnik, Chemnitz). Es dient der Vereinfachung und Optimierung der Betriebsführung via Visualisierung und einer mitlaufenden Simulation, die Prognoselastfälle betrachtet und entsprechende Betriebsführungsempfehlungen gibt. Dank dieses Systems standen ebenfalls Messdaten über lange Zeiträume und in unterschiedlichen zeitlichen Auflösungen zur Verfügung.



Bild 2.4 Luftbild der KA Chemnitz (Quelle: Google Earth)

Bericht DBU-Projekt Phase 2

Regelkonzepte

Die **Interne Rezirkulation** wird proportional zum Zufluss geregelt (4 bei Trockenwetter, 1 bei Regenwetter). Handeingriffe werden vereinzelt unter Nutzung der Onlinesimulation durchgeführt. Die Messung des Rezirkulationsstromes wird mit „Kanalmäusen“ (Ultraschall und Drucksensor) durchgeführt. Nur bei regelmäßiger Spülung kann ein zuverlässiger Betrieb dieses Messgerätes gewährleistet werden.

Der **Sauerstoffeintrag** in die Nitrifikation wird in Abhängigkeit der jeweils vorgegebenen Sollwerte über 4 Sauerstoffsonden je Straße geregelt.

Der **Rücklaufschlamm** wird zuflussproportional betrieben. Bei Trockenwetter beträgt das Verhältnis 1,0 bis 1,1, bei Regenwetter ca. 0,7. Die dafür herangezogene Durchflussmessung befindet sich im Zulaufbereich der Kläranlage. Ungünstig ist insbesondere die bei Regenereignissen sofortige Steigerung des RS-Stroms parallel zum Anstieg des Zuflusses. Der Absetzprozess wird durch diese verstärkte hydraulische Belastungserhöhung zusätzlich gestört. Sinnvoll wäre eine zeitversetzte Erhöhung.

Der **Überschussschlammabzug** erfolgt kontinuierlich aus dem Rücklaufschlamm und wird in Abhängigkeit des aktuellen TS-Gehalts in der Belebung händisch angepasst (Sollwert TS: ca. 3,3 g/L).

Parallel zur biologischen P-Elimination findet eine **chemische Simultanfällung** mit FERRIFLOC (Fe-III-CISO₄, Fa. Kronos, 40%ige Lösung, Wirksubstanz: 123 g Fe/kg, Dichte 1,52 kg/L) im Ablauf der Belebungsbecken statt. Derzeit erfolgt die Zugabe durch manuelle Einstellung in Abhängigkeit des Messwertes PO₄-P im Zulauf der Nachklärbecken (MC4), d.h. hinter der Dosierstelle.

Zur Verbesserung des Schlammabsetzverhaltens wird zusätzlich in den Zulauf der Nachklärbecken ein Produkt der Fa. VTA dosiert (Kombinationsprodukt aus Aluminat und Polymeren, Al- Gehalt von 9 %, 3,2 mol Wirksubstanz). Die Dosiermenge beträgt ca. 40 L/h; im Frühjahr wird die Dosierung z.T. bis auf 160 l/h erhöht.

Wartungsarbeiten / Außerbetriebnahmen

In dem untersuchten Zeitraum sind zu Wartungszwecken meist Straßen der Belebungsanlage außer Betrieb (Tab. 2.6). In 2004 ist quasi permanent 1 Straße außer Betrieb. Von Juli 2005 bis Februar 2006 waren nur in einem Zeitraum alle 6 Straßen in Betrieb.

Bericht DBU-Projekt Phase 2

Tab. 2.6 Zeiten von Außerbetriebnahmen von Anlagenteilen

Zeitraum	Anlagenteil außer Betrieb
1.1. – 17.6.2004	Belebung Straße 2
21.6. – 26.8.2004	Belebung Straße 5
25.8.2004 – 1.7.2005	Belebung Straße 4
1.7.2005 – 20.2.2006	Keiner
28.2.2006 – 31.12.2006	Belebung Straße 6
Bis vorauss. Ende 08	Belebung Straße 3

Messungen im Bereich der Kläranlage

Die Anlage ist im Rahmen der Eigenüberwachung mit zahlreichen Messstellen ausgestattet und wurde darüber hinaus im Rahmen des Projektes um weitere ergänzt. Sämtliche Online-Daten liegen in einer zeitlichen Diskretisierung von 15 Minuten im Zeitraum vom 1.1.2004 bis 31.12.2006 sowie im Zeitraum der großtechnischen Untersuchungen (01.05.-31.08.2008) vor.

Neben den Aufzeichnungen des **Zu- und Abflusses** der Kläranlage werden die Rücklaufschlammströme, der Überschussschlammabzug, die internen Rezirkulationsströme je Straße sowie die Entlastung aus dem RÜB (BÜ+KÜ) und dessen Füllstand erfasst. In Tab. 2.7 sind die Online-Messungen der **Stoffgrößen** tabellarisch zusammengefasst.

Tab. 2.7 Onlinemesstechnik auf der KA Chemnitz

Messstelle	Eigenüberwachung
Zulauf	T
Ablauf Vorklärung	CSB, PO ₄ -P, NH ₄ -N
Belebungsbecken	TS je Straße, O ₂ (4 x je Straße!), Luftzufuhr, NO ₃ -N, PO ₄ -P in 2 Str. Ende Deni-Zone
Ablauf BB	NO ₃ -N, NH ₄ -N, PO ₄ -P, pH, T, Schlammvolumen
RS-Schlamm	(TS-Gehalt im Rahmen DBU-Projekt)
Nachklärung	Schlammspiegelhöhe je Becken
Ablauf Nachklärung	CSB, NO ₃ -N, NH ₄ -N, P _{ges} , Trübung, pH, T, LF

Neben den Online-Messungen standen ergänzend Laboranalysen (24-h-Mischproben) üblicher Parameter aus der Eigenüberwachung zur Verfügung (Tab. 2.8), mit denen mittlere Belastungen und die Wirkungsgrade der Reinigungsstufen ermittelt werden konnten.

Bericht DBU-Projekt Phase 2

Tab. 2.8 Vorliegende Laboranalysen, Stadtwerke Chemnitz

Messstelle	Parameter	Raster	Daten vorhanden	Sonstiges
Belebung	TS _{BB} , SV	täglich	01.01. 04 - 31.12. 06	Stichprobe
Zulauf ZKA	CSB, NH ₄ -N, NO ₂ -N, NO ₃ -N, P _{ges} , PO ₄ -P	Alle 1-2 d	01.01. 01 - 31.12. 07	24h-Mischprobe
Teilströme Schlammbehandlung	CSB, NH ₄ -H, NO ₃ -N, NO ₂ -N, N _{ges} , PO ₄ -P	Wöchentl	01.01. 04 - 31.12. 04	
Regenbecken (MP), Abschlag Bahrebach (SP)	CSB, NH ₄ -H, NO ₃ -N, NO ₂ -N, N _{ges} , PO ₄ -P	Bei Entlastung	01.01. 04 - 31.12. 04	
Überschussschlamm	TR, GV	Wöchentl	01.01. 04 - 31.12. 04	Stichprobe

Der Trockensubstanzgehalt im Rücklaufschlamm wird nicht messtechnisch erfasst. Im Rahmen des Projektes wurde daher eine SOLITAX-Sonde der Fa HACH-Lange im Rucklaufschlammstammelschacht der Nachklärbecken 1 und 2 installiert (09/2005). Der regelmäßige Vergleich mit Handmessungen ergab eine langfristig stabile Messung. Die Daten dienen einerseits zur Verifizierung des Klaranlagenmodells andererseits als potentielle Störgröße für die zu entwerfende Zuflussregelung.

Weiterhin wurden im Rahmen des Projektes Labor-Sondermessungen im Zu- und Ablauf der Vorklärung, in der Belebung sowie im Ablauf der Nachklärung (Modellkalibrierung) durchgeführt (Tab. 2.9).

Tab. 2.9 Sondermessungen im Rahmen des Projektes

Messstelle	Parameter	Raster	Messzeitraum	Sonstiges
Zulauf VK	T, CSB _{roh} , CSB _{fil} , NH ₄ -N, TKN	5-10 min	09.02.2007, 26.02.2007, 01.03.2007, 19.03.2007, 07.05.2007, 12.05.2007, 14.05.2007, 22.05.2007	MW-Ereignissen
Schlamm BB und RS	TS, oTS, CSB _{hom+fil}		12x im Zeitraum 10/2005 bis 07/2006	Stichproben
Ablauf NK	AFS, CSB _{hom+fil}			

2.3.2 Mittlere Betriebskennndaten

Die Zuflüsse zur Kläranlage sind in Tab. 2.10 zusammengefasst. Verglichen mit den aus den aktuellen Zuflussdaten resultierenden Bereichen gemäß ATV-DVWK Arbeitsblatt A198 liegt der Mischwasserzufluss recht hoch. Nach Bild 1 in diesem Arbeitsblatt ergeben sich für Chemnitz Spitzenfaktoren $f_{SP,S}$ von 3 – 6. Die zulässige Bandbreite $Q_M = f_{SP,S} \cdot Q_{S,d,aM} + Q_{F,aM}$ errechnet sich zu 5.000 bis 8.580 m³/h. Wie die Kläranlage auf die unüblich hohen Mischwasserzuflusse reagiert, ist in Kapitel 4.3 dargestellt. Das Ver-

Bericht DBU-Projekt Phase 2

hältnis des mittleren Trockenwetterzuflusses zum maximalen Zufluss bei Mischwasser beträgt in Chemnitz $Q_M = 3,6 \cdot Q_{T,aM,2004}$.

Tab. 2.10 Zuflüsse zur KA Chemnitz

Zufluss [m ³ /h]	2004	09.2005-10.2006
Q_M (Bemessung)		9.450
Q_{aM}	3.817	3.505
$Q_{T,aM}$	2.636	2.534
$Q_{F,aM}$	1.448	1.382 ($Q_{T,m,min} \cdot 0,8$)
$Q_{S,aM}$	1.188	1.152
$Q_{M,A198}$ (rechnerisch) = $(3 \text{ bis } 6) \times Q_{S,aM} + Q_F$	5.000 - 8.580	4840 – 8300

In Tab. 2.11 und Tab. 2.12 sind wesentliche Betriebskenndaten, d.h. Konzentrationen, Prozesskenngößen und Reinigungsleistungen der Anlage zusammengefasst (Grundlage: Online- und Handmessungen).

Tab. 2.11 Betriebskenngößen 2004 und 09.2005-10.2006

		2004	09.2005-10.2006
TS_{BB}	g/L	3,6	3,6
TS_{RS}	g/L	7,2 (bilanziert).	7,8
ISV	ml/g	108	111
Q_{RS}	m ³ /h	1,0 · Q_{Zu}	1,16 · Q_{Zu}
$Q_{ÜS}$	m ³ /h	98	93
RF	-	n.e.	4,6

Der TS-Gehalt in der Belebung liegt mit im Mittel 3,6 g/L und der Schlammindex ISV mit 111 mL/g im üblichen Bereich (nach ATV A131 üblich: 100-150). In den Wintermonaten steigen die Maximalwerte bis 164 mL/g, so dass aufgrund von fadenförmigen Organismen die Absetzfähigkeit vereinzelt ungünstig sein kann. Das Vergleichsschlammvolumen VSV beträgt im Mittel 392 ml/L (250-600 ml/L) und ist somit unterhalb des nach ATV A131 vorgegebenen Maximalwertes von 600 ml/L.

Tab. 2.12 Mittlere Belastungskenngrößen 2004 und 09.2005-10.2006

		2004	09.2005-10.2006
Schlammalter $t_{TS,ges}$	d	19,7	20 (aerob 12)
$t_{R,VK}$	h	0,9 (min : 0,24)	n.e.
$q_{A,NK}$	m/h	0,38 (max: 0,95)	0,36 (max: 1,1)
$q_{Sv,NK}$	l/(m ² ·h)	146 (max. 499)	209 (max. 580)

Das hohe Schlammalter (zum Vergleich: A131 (2000) bei 10 °C: mind. 13,1d (aerob 8d)) und die niedrigen Schlammvolumen- und Oberflächenbeschickungen verdeutlichen eine eher geringe Anlagenbelastung und erklären die insgesamt sehr guten Ablaufwer-

Bericht DBU-Projekt Phase 2

te (Tab. 2.13).

Die maximale Oberflächenbeschickung $q_{A,NK}$ von 1,1 m/h ist verglichen mit dem maximal zulässigen Wert gemäß A131 (2000) von 1,6 m/h gering. Die Schlammvolumenbeschickung q_{sv} übersteigt bei Auswertung der 15min-Werte nur 5 Mal in 3 Jahren kurzfristig den nach A131 zur Bemessung von Nachklärbecken angesetzten Maximalwert von 500 (bis zu 580 l/(m²·h) in Tagesspitze). Die vorhandene Belastung der Nachklärbecken liegt somit im üblichen Bereich der gängigen Bemessungspraxis.

Tab. 2.13 Mittlere Betriebsdaten 2004 und 9.2005 bis 10.2006

	Einheit	Zulauf		Ablauf VK		Ablauf BB		Abl. NK	
		2004	9.05-10.06	2004	9.05-10.06	2004	9.05-10.06	2004	9.05-10.06
CSB	mg/L	398	428	233	252	n.e.	n.e.	20,8	21,4
BSB ₅	mg/L	196	-	102	114	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.
TKN	mg/L	38,4	42,3	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.
NH ₄ -N	mg/L	23,1	23,9	31,8	32,8	0,3	0,2	0,1	0,1
NO ₃ -N	mg/L	0,6	0,6	n.e.	n.e.	8,5	9,2	8,7	8,1
NO ₂ -N	mg/L	0,2	0,2	n.e.	n.e.	0,2	n.e.	0,2	n.e.
P _{ges}	mg/L	5,2	4,5	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	0,4	0,3
PO ₄ -P	mg/L	2,7	2,9	2,7	2,9	0,3	0,4	n.e.	n.e.
Trübung	FNU	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	5,9	2,5
pH	-	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	6,9	6,9	7,1	7,1
LF	µs/cm	1029	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	903	913
T	°C	12,7	12,8	n.e.	n.e.	12,8	13,3	13,0	13,5

fett: aus Online-Messung

3 Modelltechnische Abbildung und Untersuchung des Einzugsgebiets Chemnitz

3.1 Kanalnetzmodell

3.1.1 Allgemeine Beschreibung

Das Kanalnetz wird mit dem hydrodynamischen Schmutzfrachtmodell Hystem-Extran-Güte vom itwh modelltechnisch abgebildet. Wesentliche Grundlage bei der Modellerstellung waren die Daten und Informationen des Kanalnetzes aus der GEP-Bearbeitung (Stand 1997), die im Format des hydrodynamischen Modells Hystem-Extran von den Stadtwerken Chemnitz (SWC) überreicht wurden.

In der **ersten Projektphase** (2005) wurde das Modell auf die aktuellen Randbedingungen (Bauwerke, Drosselabflüsse, Einwohner, Industrie etc.) der Jahre 2004 bzw. 2005 angepasst (itwh, ISI, 2006). Darüber hinaus wurden der spezifische Einwohner- und Fremdwasseranfall gemäß der Auswertung der Messdaten (vgl. Tab. 2.10) angesetzt. Der mittlere Trockenwetterabfluss beträgt 735 l/s, die Stoffkonzentrationen bei Trockenwetter wurden im Modell für CSB mit 479 mg/L und für TKN mit 48 mg/L angesetzt.

In der **zweiten Phase des Projektes (2007/2008)** wurden erneut Aktualisierungen durchgeführt:

- Berücksichtigung neu erschlossener Gebiete, was zu einer Erhöhung der Einwohnerzahl um 2800 führte. Prognoseflächen wurden nicht zusätzlich berücksichtigt, da bereits ein modifizierter Prognosezustand des Gesamtnetzes als Ausgangsbasis des Kanalnetzmodells diente.
- Angaben des Netzbetreibers zu Änderungen an den Entlastungsanlagen.
- Die überarbeitete Schmutzfrachtberechnung für die Stadt Chemnitz lieferte aktualisierte Angaben zu den Mischwasserbehandlungsvolumina sowie die Basis zu einer Plausibilitätsprüfung der Drosselleistungen an den Entlastungsbauwerken.
- Berücksichtigung von drei statt nur einem Regenschreiber.

Ungleichmäßige Überregnung

Aufgrund der im Projekt aufgestellten Regenschreiber (Kläranlage, RÜB Kapplerdrehe) und der erworbenen Niederschlagsdaten des DWD wurde in der 2. Projektphase eine ungleichmäßige Niederschlagsbelastung in den Simulationen realer Regenereignisse berücksichtigt. Hiermit können die räumlichen Unterschiede im zeitlichen Verlauf und die Intensität der Niederschlagsereignisse im Modell nachgebildet werden.

Bericht DBU-Projekt Phase 2

Anhand der Position der Regenschreiber wurde das Einzugsgebiet in 3 Bereiche eingeteilt. Jeder Punkt im Einzugsgebiet wurde dem Regenschreiber zugeordnet, der ihm am nächsten liegt (Thiessen-Polygone). Bild 3.1 zeigt die Aufteilung.

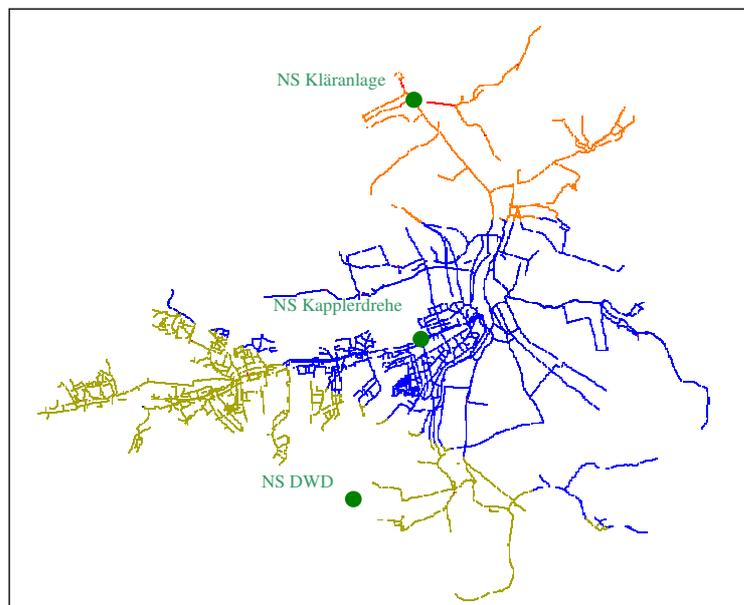


Bild 3.1 Standorte der Regenschreiber im Einzugsgebiet Chemnitz

3.1.2 Kalibrierung und Modellgüte

Die Verifikation des erstellten Kanalnetzmodells bei Regenwetter wurde anhand repräsentativer Regenereignisse mit verschiedener Intensität und unterschiedlichen zeitlichen Verläufen (Auswahlzeitraum 2004-2006) durchgeführt. Die Simulationsergebnisse wurden den Durchflussmessungen am Zulauf der Kläranlage gegenübergestellt.

Bild 3.2 zeigt die Simulationsergebnisse mit 1 bzw. mit 3 Regenschreibern. Der Beginn des Abflussgeschehens ist mit nur einem Regenschreiber nicht exakt abzubilden, da in diesem Fall kein Niederschlag aufgezeichnet wurde. Nach der Erweiterung auf drei Regenschreiber führen die zusätzlichen Niederschlagsdaten durch die Berücksichtigung einer ungleichmäßigen Überregnung zu einer Erhöhung der Simulationsgüte.

Insgesamt muss angemerkt werden, dass auch drei Regenschreiber für Einzugsgebiete in dieser Größe nicht ausreichen, um sämtliche Regenereignisse mit ihren lokal sehr unterschiedlichen Niederschlagsdauern und -intensitäten ideal abzubilden.

Bild 3.3 zeigt exemplarisch für einen ca. 3-tägigen Regenzeitraum im Juli 2006 den Vergleich zwischen simuliertem und gemessenem Zufluss zur Kläranlage sowie die Entlastungsabflüsse des Regenüberlaufbeckens am Klär- und am Beckenüberlauf. Die guten Ergebnisse erlauben es, simulative Fallstudien durchzuführen.

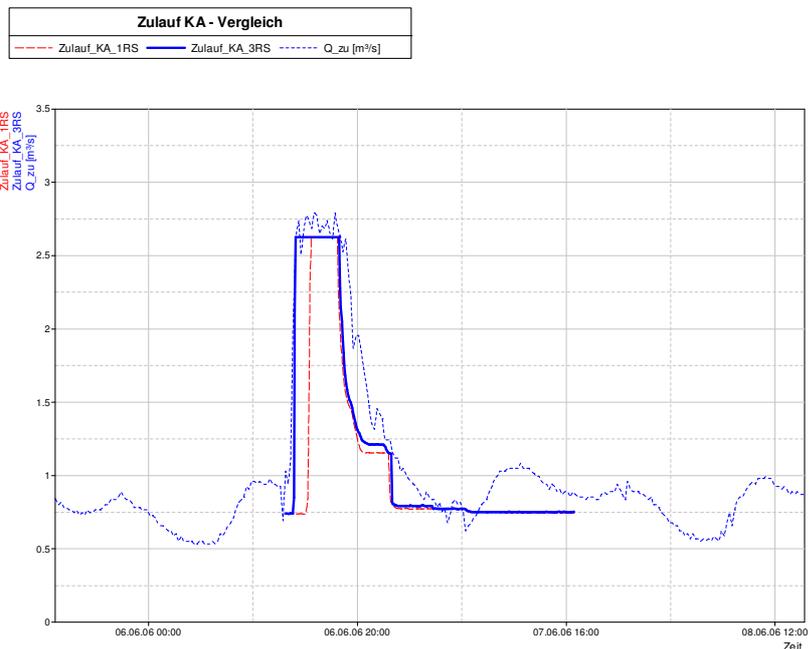


Bild 3.2 Vergleich der gemessenen und simulierten Durchflussganglinien mit einem und mit drei Regenschreibern (RS)

Die Abbildung der Stoffkonzentrationen ist trotz Nichtberücksichtigung von Abtrag und Akkumulation bzw. von Abbauvorgängen überwiegend zufrieden stellend (Bild 3.17).

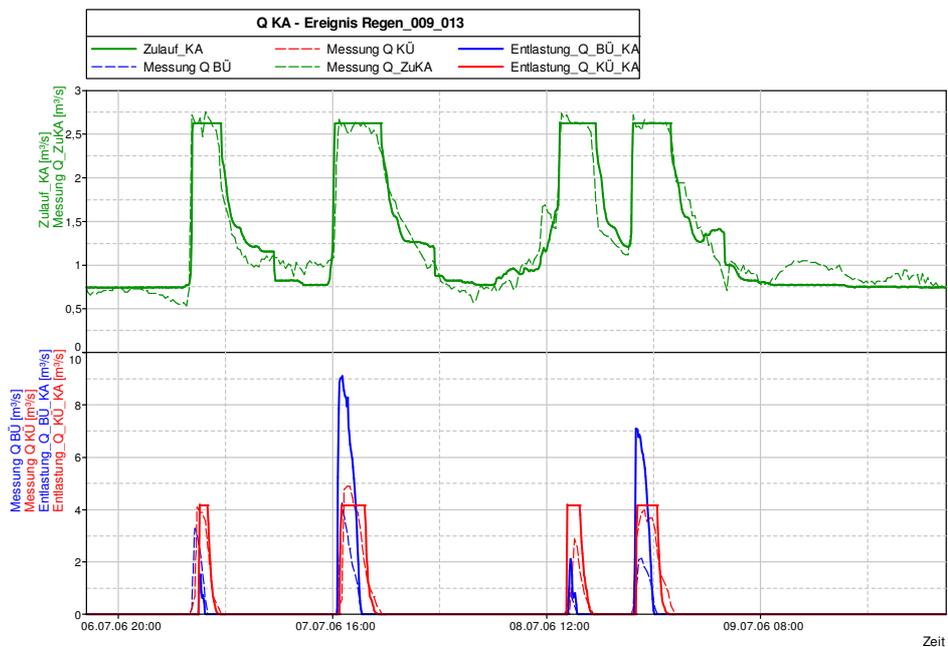


Bild 3.3 Vergleich der gemessenen und simulierten Abflüsse (KA und RÜB)

Bericht DBU-Projekt Phase 2

3.2 Kläranlagenmodell

3.2.1 Stand aus Projektphase 1, Vorgehen in Phase 2

Für die integrierte Simulationsstudie wurde ein dynamisches Kläranlagenmodell in SIMBA (ifak) bestehend aus folgenden Teilsystemen verwendet:

- Vorklärung: volldurchmischtes Becken, Absetzprozesse nach Otterpohl (1995)
- Belebung: ASM1-Modell, P-Fällung durch Berechnung des zusätzlichen Schlamm-anfalls berücksichtigt
- Nachklärung: Schichtenmodell nach Takács et al. (1991)

Das Modell aus Projektphase 1 (Modell „Belebung“ basiert auf dem Online-Modell der Fa. Optum Systemtechnik) wurde anhand von Daten aus 2004 kalibriert und verifiziert. Die Realität konnte mit diesem Modell bereits recht gut wiedergegeben werden. Um insbesondere die dynamischen Effekte bei Mischwasserereignissen noch besser und detaillierter wieder zu geben, sollten in der 2. Phase das Vor- und Nachklärungsmodell weiter optimiert werden. Die Prozesse in der Vorklärung wurden dafür in einem geson- derten Messprogramm untersucht. Für die sonstige Modellentwicklung und Kalibrierung wurde der Zeitraum Juni bis September 2006 ausgewählt.

Zur ebenfalls durchgeführten Nach-Kalibrierung der biologischen Stufe wurden die tat- sächlich gemessenen Durchflüsse für Rezirkulation und Rücklaufschlamm sowie die Online-Messwerte aus dem Ablauf Vorklärung eingelesen, d.h. die Vorklärung dabei zunächst modelltechnisch nicht berücksichtigt. Erst für die integrierte Simulation wurde ein Modell inklusive Vorklärung und realitätsnaher Abbildung der vorhandenen Regel- kreise (Rücklaufschlamm etc.) erforderlich. Das Modell bietet daher die Möglichkeit, mit Schaltern zwischen dem einen oder dem anderen Simulationsstatus zu wechseln.

3.2.2 Transport- und Umsatz-Prozesse in der Vorklärung

Bedingt durch die Anordnung der Online-Messgeräte im Ablauf der Vorklärung war die bisherige Abbildung im Modell nicht hinreichend abgesichert. In der Projektphase II wurden deshalb ergänzende Untersuchungen zum Verhalten der Vorklärung durchge- führt. Hauptziele dieser Untersuchungen waren:

- Realitätsnahe Abbildung des Verweilzeitverhaltens und der Absetzwirkung in der Vorklärung im integrierten Simulationsmodell
- Bestimmung des TKN/NH₄-N-Verhältnisses im Ablauf der Vorklärung für die kor-

Bericht DBU-Projekt Phase 2

rekte Interpretation des $\text{NH}_4\text{-N}$ Online-Messwertes

Als Grundlage wurde das Modell nach Otterpohl (1995) beibehalten. Die Anpassung der Modellkonfiguration, insbesondere der Anzahl der Becken in der Rührkesselkaskade erfolgte anhand

- eigener Messungen zum Verweilzeitverhalten (Temperatur, CSB)
- simulierter Zulaufganglinien
- theoretischer Betrachtungen.

Im Zeitraum Januar bis Mai 2007 wurden hierfür am Vorklärbecken der ZKA Chemnitz-Heinersdorf eigene Messungen zur Analyse des Verweilzeitverhaltens durchgeführt. Im Verteilerbauwerk 1 vor den Vorklärbecken sowie in der Sammelrinne nach den Vorklärbecken wurden je ein Probenehmer und eine Temperatursonde installiert. Jeweils zu Ereignisbeginn wurden die Geräte vom Betriebspersonal aktiviert. Die Proben wurden anschließend im Labor der TUD auf die Parameter CSB_{hom} , CSB_{fil} , TKN, $\text{NH}_4\text{-N}$ und Leitfähigkeit untersucht. Die Daten der Temperatursonde wurden mit einer Auflösung von einer Minute aufgezeichnet. Die stofflichen Parameter wurden im Raster von 5 bzw. 10 min. bestimmt. Aufgrund einer für diesen Zeitraum stark unterdurchschnittlichen Niederschlagsaktivität sowie technischer und organisatorischer Probleme in der Anfangsphase wurden nur sieben Ereignisse erfasst.

Tab. 3.1 Ereignismessungen

Datum	Verwertbare Messung		Bemerkungen
	Temperatur	Stoffliche Parameter	
09.02.07		X	
26.02.07	X		
01.03.07	X	X	
18.03.07	X	X	2 h-Werte
07.05.07	X	X	
12.05.07		(X)	Nur LF
14.05.07	X	(X)	Nur Ablauf , da Akku defekt
22.05.07	(X)	X	

Für die simulative Anpassung des Vorklärbeckenmodells bzw. der Anzahl der strömungsäquivalenten Anzahl Rührkessel wurde die **Temperatur** als konservativer Tracer betrachtet. Allerdings waren die Mischwasser bedingten Temperaturgradienten so gering, dass das Signal für die Kalibrierung der Anzahl Rührkessel zu wenig ausgeprägt war.

Bericht DBU-Projekt Phase 2

Die durchgeführten Ereignismessungen wurden simulativ unter Verwendung des Vorklärbeckenmodells von Otterpohl (1995) nachvollzogen. Dieses berechnet den Wirkungsgrad der CSB-Elimination als Funktion des partikulären CSB-Anteils und der Aufenthaltszeit unter Nutzung der folgenden empirischen Beziehung.

$$\eta = (2,88 \cdot f_{\text{part}} - 0,118) \cdot \left(1,45 + 6,15 \cdot \ln \left(\frac{V_{\text{VK}}}{Q_{\text{zu}}} \right) \right) \quad (1)$$

$$\frac{dX_{\text{j,ab}}}{dt} = (X_{\text{j,zu}} \cdot (1 - \eta) - X_{\text{j,ab}}) \frac{V_{\text{VK}}}{Q_{\text{zu}}} \quad (2)$$

Der partikuläre CSB wurde hierfür entsprechend den analytisch ermittelten mittleren Verhältnissen während des Ereignisses festgelegt. Basierend auf Erfahrungen an anderen Kläranlagen wurde der nach Otterpohl (1995) berechnete Wirkungsgrad pauschal mit dem Faktor 0,6 korrigiert.

Zur Annäherung des Verweilzeitverhaltens wurden für die Berechnungen die Anzahl der in Reihe geschalteten Becken variiert. Die Ergebnisse sind exemplarisch für eine Ereignis (für 1 und 3 Becken) in Bild 3.4 dargestellt. Charakteristisch für alle Ereignisse ist, dass die Simulation mit einem Becken den zeitlichen Verlauf zu sehr spreizt und gleichzeitig zu hohe Ablaufkonzentrationen berechnet. Drei Becken hingegen bewirken eine leicht verspätete und zeitlich gestauchte Dynamik bei gleichzeitig zu geringen Ablaufkonzentrationen. Die beste Übereinstimmung wird in der Regel bei Verwendung von zwei Becken erzielt.

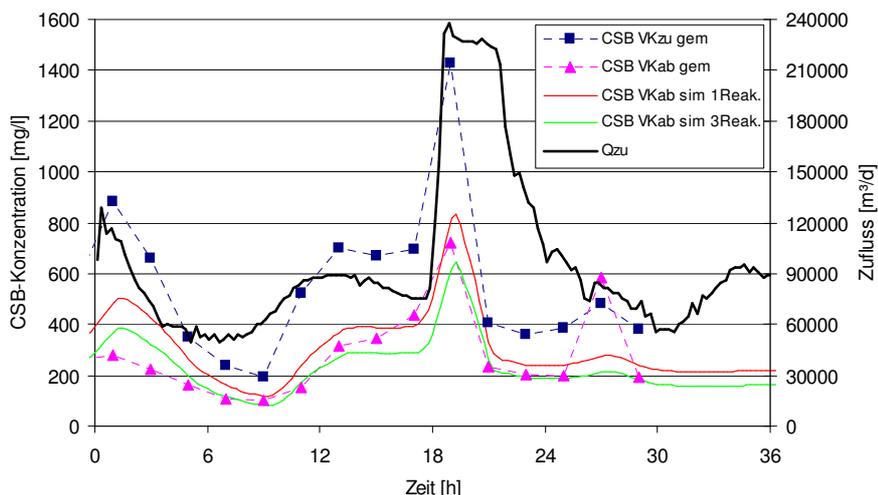


Bild 3.4 Simulation der CSB-Ganglinie am Ablauf Vorklärung, Ereignis 18.03.07

Für eine abschließende Beurteilung wurden drei Mischwasserereignisse (06.06.06; 26.05.06, 29.05.06) statistisch ausgewertet. Als Input für das Vorklärbeckenmodell

Bericht DBU-Projekt Phase 2

dienten die mittels Kanalnetzmodell simulierte Informationen (Q, CSB, TKN). Aufgrund der Modellgüte im integrierten Simulationsmodus wird als „bester Kompromiss“ die Vorklärung im Modell durch zwei in Reihe geschaltete Vorklärbecken abgebildet ($V_{VK} = 0.5 \cdot V_{VK,1} + 0.5 \cdot V_{VK,2}$).

Bestimmung des TKN / NH₄-N –Verhältnisses im Ablauf Vorklärung

Für eine kontrollierte Beschickung der Kläranlage ist die genaue Kenntnis der insgesamt zugeführten Stickstofffracht erforderlich. Im Ablauf der Vorklärung wird NH₄-N als Online-Wert erfasst. TKN wird nur im Rohwasser als 24h-Mischprobe gemessen. Hier liegt das mittlere Verhältnis von TKN zu NH₄-N bei ca. 1.8.

Für die Abschätzung des TKN/NH₄-N-Verhältnisses im Ablauf Vorklärung wurden deshalb zusätzlich durchgeführte Analysen der TUD und der SWC im Zulauf zur Vorklärung hinzugezogen. Die Verhältnisse schwanken hier bei Trockenwetter zwischen 1,25 und 1,67, das Mittel liegt bei ca. 1,5. Bei Regenwetter steigt das TKN-NH₄-N-Verhältnis deutlich an, vermutlich aufgrund erhöhter partikulärer Stickstoff-Anteile.

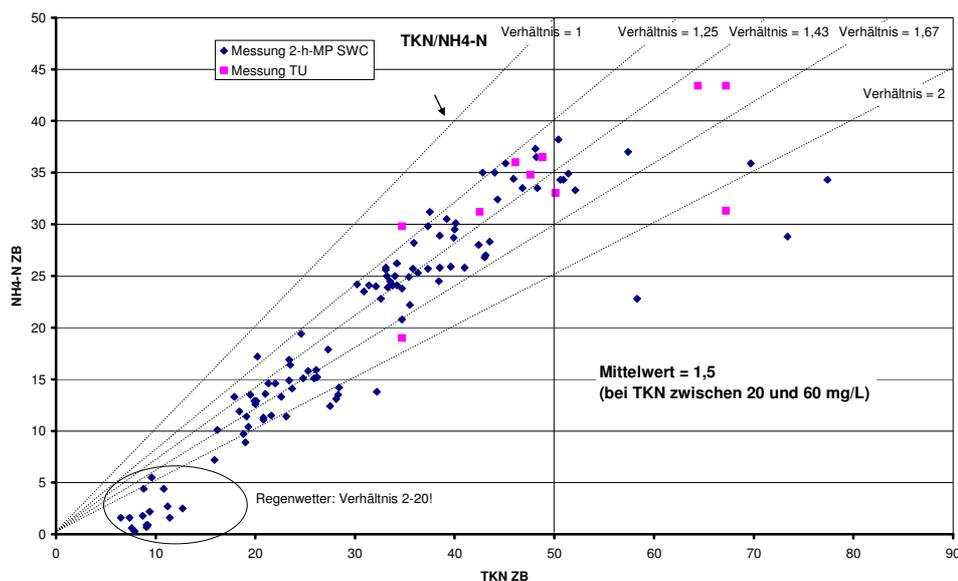


Bild 3.5 TKN/NH₄-N- Verhältnis im Zulauf Vorklärung, Ergebnis der durchgeführten Sondermessungen

3.2.3 CSB-Fraktionierung

Die Fraktionierung im Zulauf einer Kläranlage schwankt mit der Aufenthaltszeit im angeschlossenen Kanalnetz. Je länger Abbau- und Hydrolyseprozesse wirken können, desto weniger leicht abbaubares Substrat steht der Denitrifikation zur Verfügung.

Bei der Kalibrierung des Modells wurde deutlich, dass bei Verwendung einer statischen Fraktionierung des CSB kein befriedigendes Ergebnis hinsichtlich der Abbildung der Denitrifikation zu erwarten ist. Bei Trockenwetterzufluss kommt es auf der Kläranlage oft zu einer Substratlimitierung, die hohe, vom Rezirkulationsverhältnis unabhängige Nitratblaufkonzentrationen zur Folge haben.

Für eine befriedigende Modellanpassung wurde deshalb eine dynamische CSB-Fraktionierung eingeführt. Der konstante Faktor a_{XI} wurde durch eine lineare empirische Funktion ersetzt, die a_{XI} in Abhängigkeit des Zuflusses Q_{zu} , der in m^3/d eingegeben werden muss, festgelegt.

$$a_{XI} = 2 * 10^{-6} * Q_{zu} + 0.25 \quad (3)$$

Für die Funktion wurde eine Obergrenze von 0,2 bei $Q_{zu} \leq 25.000 m^3/d$ und eine Untergrenze von 0,1 bei $Q_{zu} > 75.000 m^3/d$ definiert (siehe Bild 3.6). Die Veränderung von a_{XI} stellt sich vorwiegend im Bereich der Trockenwetterbelastung ein. Die Erhöhung resp. Senkung des a_{XI} geht zu Lasten des langsam abbaubaren Anteils a_{XS} .

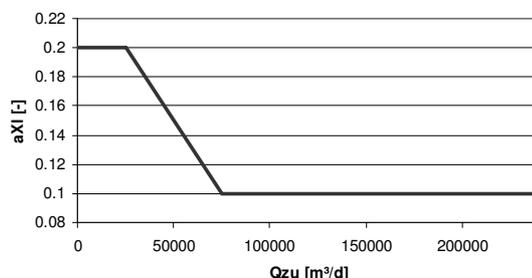


Bild 3.6 Dynamischer, inerter CSB-Anteil a_{XI} in Abhängigkeit von Q_{zu} .

Zur Anpassung des CSB-Ablaufwerts wurde weiterhin der gelöste inerte Anteil angepasst. Tab. 10.1 (Anhang) zeigt die gewählte Fraktionierung.

Eine gute Modellanpassung konnte nur durch einen im Vergleich zu Standardwerten (z.B. Bornemann et al. (1998)) sehr hohen Anteil schwer abbaubaren Substrats X_s und entsprechend niedrigen Anteil des leicht abbaubaren CSB S_s erreicht werden. Diese Wahl der Fraktionierung wurde erforderlich, da im ASM1 die biologische P-Elimination, bei der im vorgeschalteten anaeroben Beckenabschnitt eine verstärkte Zwischenspeicherung leicht abbaubaren CSBs erfolgt, nicht abgebildet wird. Der verfügbare Anteil leicht abbaubaren Substrats ist damit im anoxischen Becken eher gering.

3.2.4 Kalibrierung der biologischen Prozesse

Für die Kalibrierung der biologischen Prozesse wurden verschiedene Modellparameter geändert (Tab. 10.2). Die Änderungen zum in Projektphase 1 verwendeten Parametersatz werden nachfolgend im Einzelnen erläutert.

Um die Nitrifikation im Belebungsbecken besser wiederzugeben, wurde die Sterberate der Nitrifikanten b_A von ursprünglich 0.1 d^{-1} auf 0.07 d^{-1} gesenkt. Damit befindet sich diese am unteren Ende des im ASM1 angegebenen Bereichs von $0.05 - 0.15 \text{ d}^{-1}$. Diese Einstellung reduziert zwar die Ammoniumpeaks, produziert aber immer noch zu hohe Konzentrationen während der Regenereignisse (siehe Bild 3.7). Auf eine weitere Senkung der Sterberate wurde verzichtet, um eine gewisse Sicherheit in den Lastfallstudien zu gewährleisten.

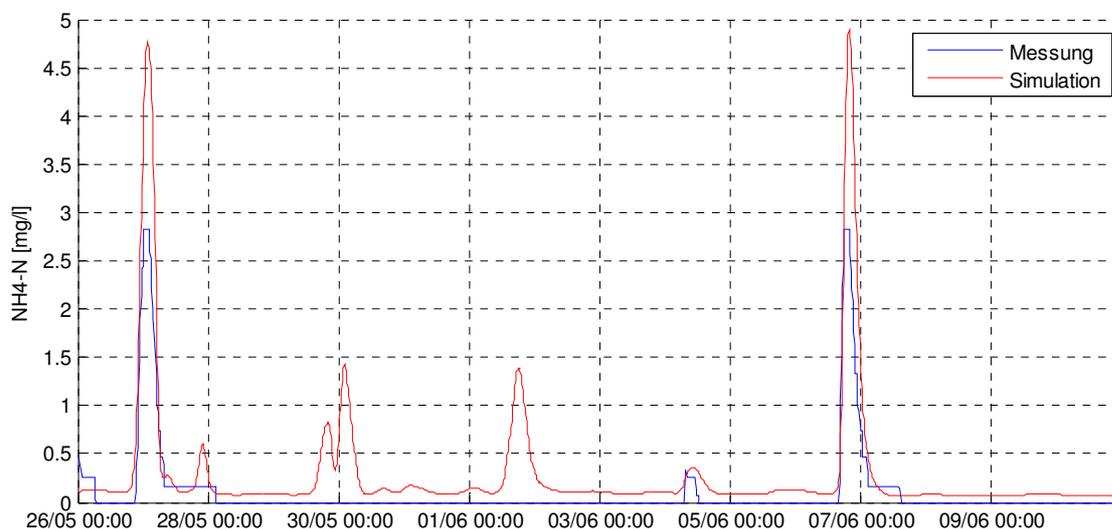


Bild 3.7 $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration im Ablauf Belebung – simuliert und gemessen

Die Kalibrierung der Denitrifikation erwies sich aufgrund der nicht vollständig möglichen Abbildungen der tatsächlichen Substratzuführung (s. Kap. 3.2.3) als problematisch. In verschiedenen Zeiträumen gab es zum Teil starke Abweichungen zwischen Messung und Simulation der Nitratlaufwerte. Um den eher zu geringen Nitrat-Konzentrationen in der Simulation entgegen zu wirken, wurde der Korrekturfaktor für die Hydrolyse unter anoxischen Bedingungen η_H von 0,6 auf 0,4 gesenkt. Dies entspricht der Empfehlung im ASM1. Weiterhin wurde der Korrekturfaktor η_G für das Wachstum heterotropher Biomasse unter anoxischen Bedingungen von 0,8 auf 0,6 gesenkt und die Halbsättigungskonstante K_{NO} von 0,5 auf 0,6 $\text{gNO}_3\text{-N/m}^3$ angehoben.

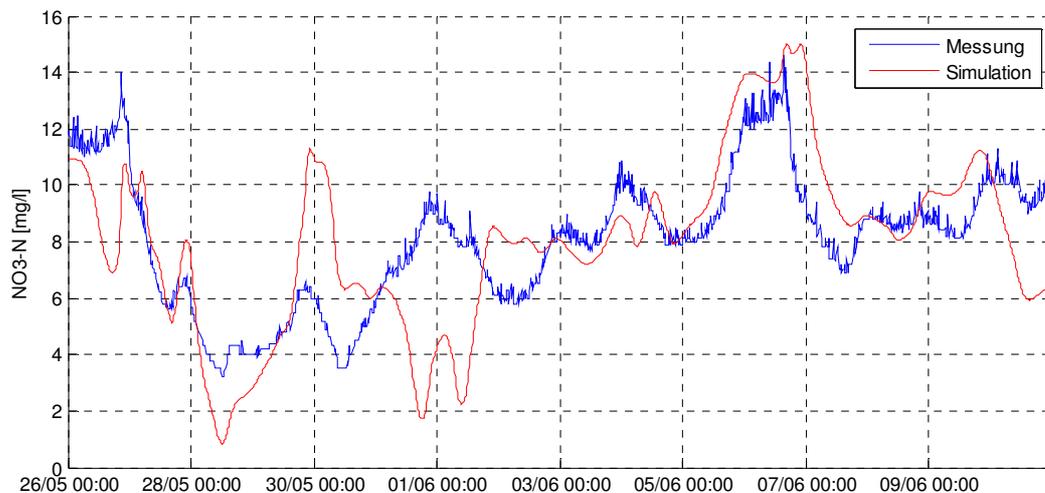


Bild 3.8 Vergleich simuliert und gemessen im Ablauf Nachklärung

Mit diesem Parametersatz konnten die Ergebnisse der Simulation substantziell verbessert werden. Insbesondere bei Regenereignissen konnten eine relativ gute Übereinstimmung mit den Messungen erzielt werden (Bild 3.8, 06.06.). Ein für alle Zeiträume vollständig befriedigendes Ergebnis konnte aufgrund der o.g. Dynamik beim zugeführten Substrat nicht erreicht werden.

3.2.5 Absetzprozesse im 1d-NK-Modell

Vorversuche mit verschiedenen Nachklärbeckenmodellen ergaben, dass die Ablaufwerte mittels des Modells von Takács et al. (1991) gut reproduziert werden können. Dies gilt bei konstanten Modellparametern jedoch nur für kurze Zeiträume. Grund hierfür ist die Abhängigkeit der Parameter vom momentanen ISV. Um das Takács-Modell für lange Zeiträume verwenden zu können, wurde der Modell-Ansatz von Takács mit der Berechnung der maximalen Sinkgeschwindigkeit v_0 und des Absetzparameters r_h nach Härtel (1990) gekoppelt.

$$v_0 = 17,4 * e^{-0,0113 * ISV} + 3,931 \quad [\text{m/h}] \quad (4)$$

$$r_h = (-0,9834 * e^{-0,00581 * ISV} + 1,043) * 10^{-3} \quad [\text{m}^3/\text{g}] \quad (5)$$

In Bild 3.9 sind diese Abhängigkeiten grafisch dargestellt. Mit Hilfe einer Batchprogrammierung ist es möglich, dem Kläranlagenmodell in Tagesschritten eine aus der Formel von Härtel hergeleitete, maximale Sinkgeschwindigkeit v_0 zuzuweisen. In Bild 3.10 sind die resultierenden Absetzkurven für den Bereich des ISV von 50 bis 160 ml/g dargestellt. Das obere Plateau wird durch die praktische Sinkgeschwindigkeit

Bericht DBU-Projekt Phase 2

definiert, die Takács in der Größenordnung von 112-150 m/d angibt.

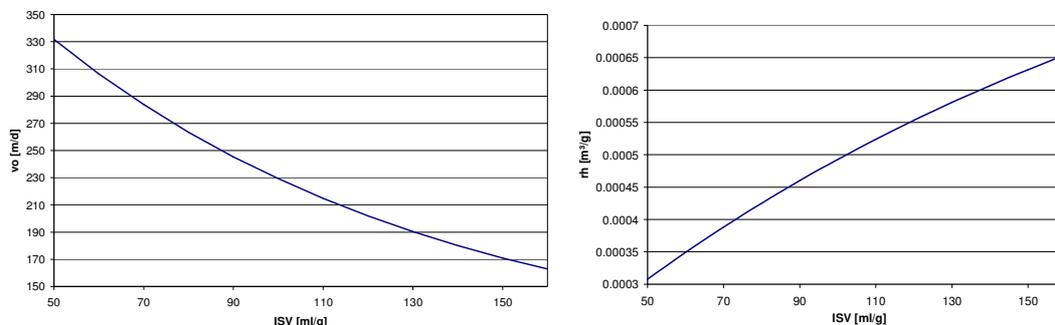


Bild 3.9 Links: Berechnung der Sinkgeschwindigkeit v_0 als Funktion des ISV
Rechts: Absetzparameter r_h in Abhängigkeit des ISV
(nach Härtel, 1990).

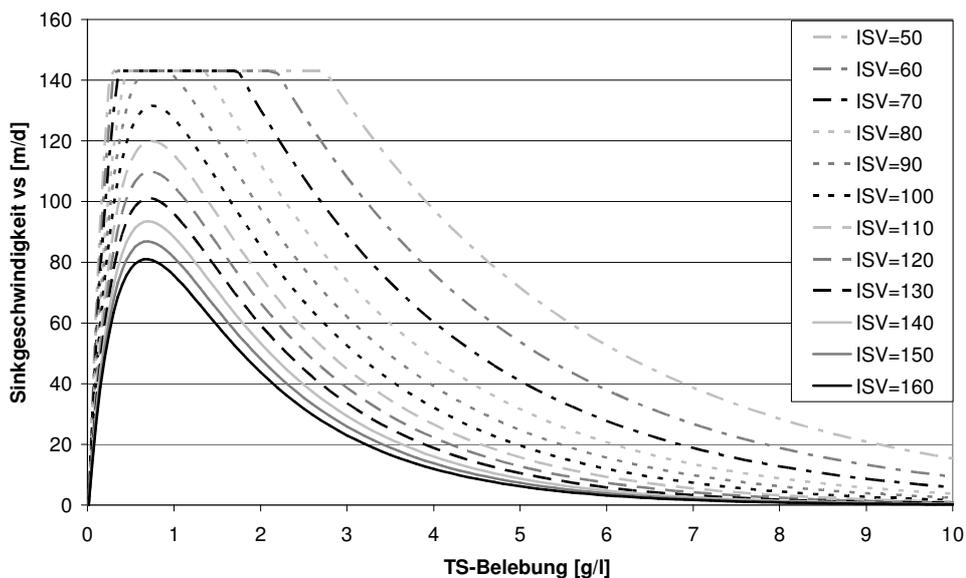


Bild 3.10 Resultierende Sinkgeschwindigkeit v_s nach Takács et al. (1991) für verschiedene ISV.

Die mit dem Takács-Ansatz erzielten Simulationsergebnisse zeigen über den Kalibrierungszeitraum eine gute Qualität für den $CSB_{\text{hom (gesamt)}}$ (Bild 3.11).

Bericht DBU-Projekt Phase 2

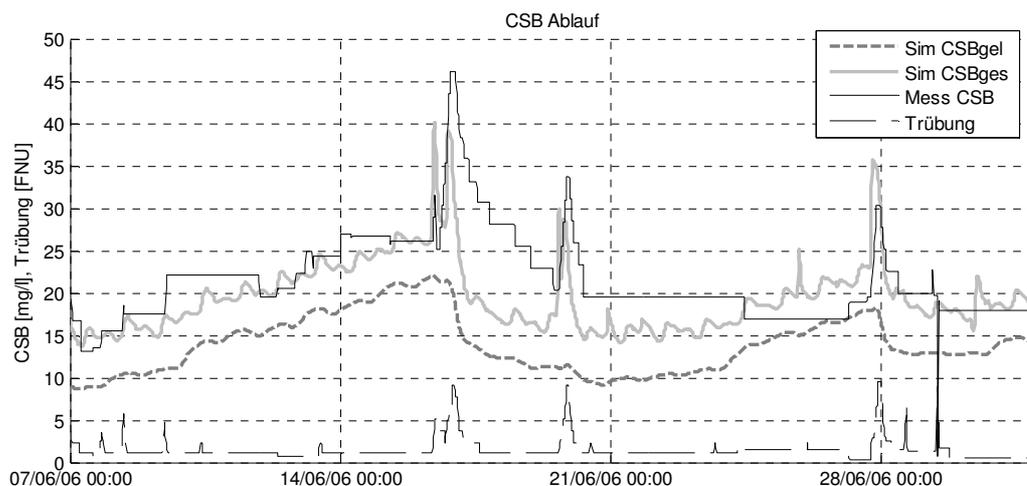


Bild 3.11 CSB-Ablauf Nachklärung Modell und Messwert

Trotz der kontinuierlichen Anpassung der beiden Parameter v_0 und r_h als Funktion des ISV bleibt die Modellgüte mit dem Takács-Modell über einen längeren Simulationszeitraum nicht stabil erhalten und würde eine periodische Nachkalibrierung erfordern. Für längere Simulationszeiträume erwies sich das Modell von Otterpohl/Freund einerseits als stabiler (Bild 3.12) und hat andererseits den Vorteil, dass in SIMBA die Abhängigkeit der Modellparameter vom ISV bereits berücksichtigt ist. Für kurze Zeiträume mit weitgehend unveränderlicher Schlammbeschaffenheit ist das Modell von Takács hingegen gut zur Beschreibung dynamischer Effekte nutzbar und reagiert sensitiver auf Veränderungen der Hydraulik und Schlammverlagerung. Das Modell von Otterpohl/Freund beschreibt die Trends ebenfalls richtig, die kurzfristige Dynamik wird mitunter jedoch zu träge abgebildet.

Die Wahl des Modells ist damit letztlich von der Zielstellung abhängig. Hier wurde ein hybrides Vorgehen gewählt. Für die langfristige Modellkalibrierung wurden der Schlamm Spiegel und die Eindickung mit dem Otterpohl/Freund-Modell berechnet. Für die Entwicklung und Erprobung des Zulaufreglers war hingegen eine hohe Sensitivität des Schlammspiegels notwendig. Bei den hierfür ausgewählten Einzelereignissen wurde deshalb parallel der Schlamm Spiegel aus dem Takács-Modell abgegriffen. Dies erforderte allerdings eine Nach-Kalibrierung der Modellparameter für jedes Ereignis (vgl. Bild 3.20).

Die Simulationsergebnisse für den TS des Rücklaufschlammes wurden von beiden Modellen gut wiedergegeben. Zur Einhaltung der Massenbilanz wird dieser in der Simulation vom Takács-Modell abgegriffen und weiterverwendet.

Die konstanten Modellparameter beider Modelle sind im Anhang (Tab. 10.3 und Tab. 10.4) aufgelistet.

Bericht DBU-Projekt Phase 2

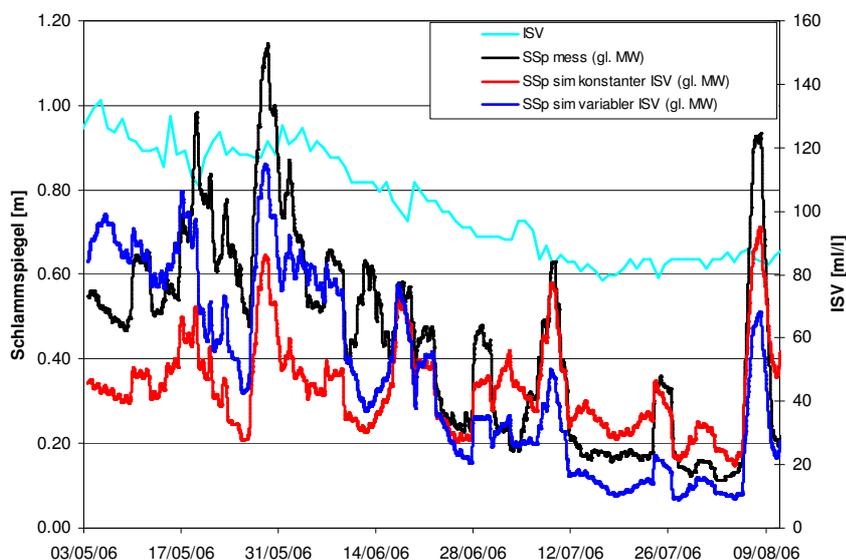


Bild 3.12 Vergleich des simulierten Schlammspiegelniveaus mit konstanten und variablen ISV als gleitende Mittelwerte über 2 Tage (OF-Modell).

3.2.6 Realitätsnahe Abbildung der Regelkreise

Belüftung

Für die Modellkalibrierung wurden die aufgezeichneten O_2 -Gehalte verwendet. Für die integrierte Simulation wurde hingegen die vorhandene Sauerstoffregelung weitgehend realitätsnah abgebildet. Für jeden der drei festgelegten Belebungsbeckenabschnitte gibt es modelltechnisch einen Regler mit P-Verhalten. Um die vorgegebene maximale Belüftungskapazität nicht zu überschreiten, wurde ein Maximalwert vorgegeben.

Interne Rezirkulation

Die Änderungen am Rezirkulationsregler beziehen sich auf die Umschaltgrenzen zwischen Trocken- und Regenwetterbetrieb. Der Schwellwert für die Umschaltung von Trocken- auf Regenwetterbetrieb liegt bei $200.000 \text{ m}^3/\text{d}$. Bei der Umschaltung von Regen- auf Trockenwetterbetrieb hingegen wurde ein Schwellwert von $190.000 \text{ m}^3/\text{d}$ festgelegt. Das Umschaltverhalten ist aus Bild 3.13 ersichtlich. Während Mischwasserzufluss fällt das Rezirkulationsverhältnis von 4 auf 1 zurück und ist damit deckungsgleich mit dem Zufluss zur KA. Die Auswertung der Messdaten ergab, dass das Rezirkulationsverhältnis langfristigen Schwankungen unterliegt. Somit kommt es zu Abweichungen zwischen gemessenem und simuliertem Recyclestrom. Um für die Simulation von Mischwasserereignissen möglichst gute Initialzustände zu generieren, werden unter Trockenwetterbedingungen Messdaten als Input eingelesen.

Bericht DBU-Projekt Phase 2

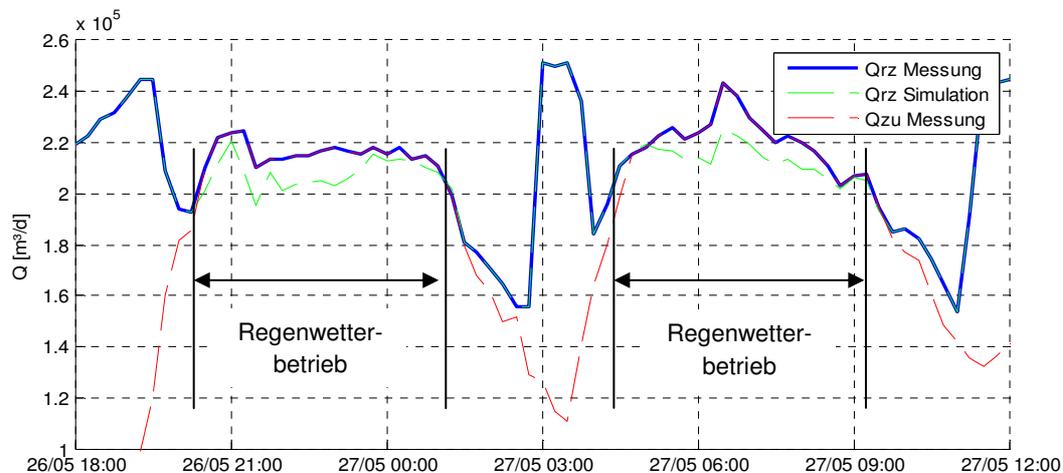


Bild 3.13 Interne Rezirkulation bei Trocken- und Regenwetterbetrieb.

Rücklaufschlamm

Wie bei der Rezirkulation wurde die Regelung des Rücklaufschlammes hinsichtlich der Umschaltunkte zwischen Trocken- und Regenwetter angepasst (Umschaltung Trocken- auf Regenwetterbetrieb bei 200.000 m³/d und von RW- auf TW-Betrieb bei 190.000 m³/d). Das Verhalten des Rücklaufstroms ist in Bild 3.14 dargestellt.

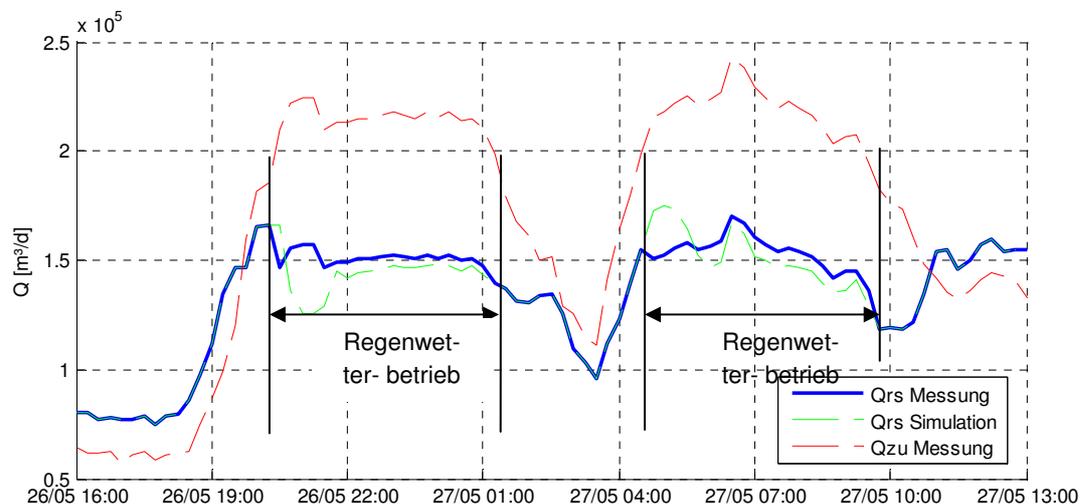


Bild 3.14 Rücklaufschlamm bei Trocken- und Regenwetterbetrieb.

Überschussschlammabzug

Der Überschussschlammabzug wird auf der KA Chemnitz momentan händisch geregelt. Es wurde trotzdem eine Regelung auf den TS des Belebungsbeckens integriert, welche bei Bedarf zugeschaltet werden kann (z.B. weitergehende Simulationsstudien).

Bericht DBU-Projekt Phase 2

3.3 Gesamtmodell

3.3.1 Kopplung der Modelle

Die Modelle in den Programmen HYSTEM-EXTRAN-GÜTE (HEG) und SIMBA werden parallel gekoppelt, d.h. die Simulation beider Systeme erfolgt zeitgleich auf einem Computer und die simulierten Werte werden laufend und automatisch, ohne manuelle Aufbereitung, von einem Programm zum anderen übermittelt.

Die Schnittstelle bzw. Verbindung zwischen den o.g. Programmen wird durch die itwh-Steuerungssoftware CONTROL hergestellt. Beliebige Daten fließen dort zusammen und werden entsprechend verarbeitet, z.B. mit Regeln belegt und weitergereicht. In Bild 3.15 ist das Zusammenspiel zwischen den Programmen dargestellt.



Bild 3.15 Kopplung Hystem-Extran-Güte und Simba via itwhControl

Für den simulativen Reglerentwurf war es letztlich erforderlich, 23 Parameter aus SIMBA nach CONTROL zu übergeben und 3 Parameter von HEG nach SIMBA. Im Einzelnen werden folgende Parameter via CONTROL transferiert (Tab. 3.2).

Tab. 3.2 Informationsfluss zwischen den Programmen

	HEG => Control => Simba	Simba => Control	Control => HEG
Parameter	Q, CSB _{hom} , TKN	ZB: CSB, NH ₄ -N Ablauf BB: NH ₄ -N, NO ₃ -N, TS, T AN: NH ₄ -N, NO ₃ -N, CSB _{hom} , P _{ges} , N _{gel} , AFS NK: Schlamm Spiegel Takács + OF Sonstige: TS _{RS} , Q _{ÜS} , Q _{RZ} , Q _{RS} , NO _{3DN} , Messwerte: P _{ges} AN, 24hMP: ISV, SV, TS _{BB}	Q _{Zu,KA}

Bericht DBU-Projekt Phase 2

Aus den bei Mischwasserereignissen auf der Kläranlage kritischen und somit maßgebenden Größen (s. Spalte: Simba => Control) wurden Regelalgorithmen mit der Stellgröße „Zufluss zur Kläranlage“ entwickelt (s. Kap.5).

Da im ASM1 nicht sämtliche für den Reglerentwurf erforderlichen Parameter als Fraktionen zur Verfügung standen, wurden manche Parameter in SIMBA hilfsweise generiert (z.B. P_{ges} oder Trübung). Teilweise wurden aber auch reale Messwerte direkt eingelesen, um diese in der geplanten Regelung berücksichtigen zu können (z.B. ISV).

Bild 3.16 zeigt ein vereinfachtes Beispiel (aus Projektphase 1) die Umsetzung der Datenübergabe in Simba mit dem speziell dafür entwickelten SIMBA-Block „itwh-CONTROL“ (s. auch Bild 10.1, Übergabeblock für Phase 2).

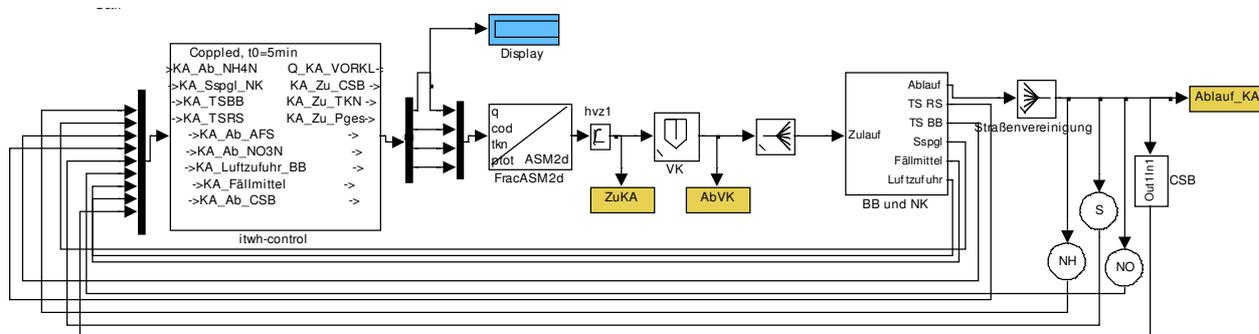


Bild 3.16 Übergabe der Parameter von Simba an Control

Vor der integrierten Simulation ausgewählter Regenereignisse bzw. der Durchführung einer Lastfallstudie sind folgende Vorarbeiten mit den ungekoppelten Modellen sinnvoll:

- Einschwingen des Kläranlagen-Modells bei Trockenwetter (ca. 100 Tage) und Speicherung des Zustands.
- Durchführung der Trockenwettersimulation mit dem Kanalnetzmodell bis Volumenfehler ausreichend gering ist.
- Durchführung der Oberflächenabflusssimulation mit HYSTEM für den jeweiligen Regenzeitraum.

Bericht DBU-Projekt Phase 2

3.3.2 Nachkalibrierung des Gesamtmodells

Um eine möglichst hohe Modellgüte erreichen zu können, wurde für die ausgewählten Regenereignisse der Fallstudie (Kap. 3.4) eine Nachkalibrierung wesentlicher Parameter durchgeführt. Nachfolgende Zusammenstellung zeigt die Anpassungen am Kläranlagenmodell in SIMBA sowie am Kanalnetzmodell in HYSTEM-EXTRAN-Güte (HEG):

- Anzahl der Straßen der biologischen Stufe (SIMBA)
- Absetzparameter v_0 und r_H des NKB-Modells von Takacs und ISV bei Otterpohl-Freund (SIMBA)
- Empirische Anpassung der Faktoren, aus denen Ersatzweise die Parameter P_{ges} und Trübung im Ablauf der Nachklärung berechnet werden, um dem Messwert im IST-Zustand so nahe wie möglich zu kommen (SIMBA).
- Trockenwetterabfluss Q_{TW} (eingestellt zwischen 620 und 800 l/s), Konzentrationen CSB und TKN zu Beginn eines Ereignisses (HEG)
- Bei zwei sehr langen Ereignissen musste die Niederschlagshöhe angehoben werden, um auf die gemessene Abflusswelle zu kommen.

3.3.3 Modellgüte, Fehler und Unsicherheiten des Gesamtmodells

Visuelle Modellgüte

Die nachfolgenden Bilder zeigen visuell die erreichte Qualität des integrierten Modells für ausgewählte Mischwasserereignisse (Zufluss zur KA siehe Ergebnisse Kap. 3.1.2.). Bild 3.17 zeigt die Konzentrationsganglinien von CSB und Stickstoff im Zu- und Ablauf der Vorklärung. Messwerte liegen als 15-min-Werte nur am Ablauf der Vorklärung vor. Im Zulauf existieren lediglich Werte aus 24-h-Mischproben, so dass ein Vergleich insbesondere bei der starken Dynamik bei Mischwasserereignissen nur sehr eingeschränkt möglich ist. Die Dynamik im Ablauf der Vorklärung wird beim Ammonium über den gesamten Zeitraum gut abgebildet.

In Bild 3.18 sind die Simulations- mit den Stickstoff-Messwerten im Ablauf der Kläranlage gegenübergestellt. Sowohl beim Ammonium als auch beim Nitrat wird sowohl die Dynamik als auch der absolute Wertebereich gut wiedergegeben.

Bericht DBU-Projekt Phase 2

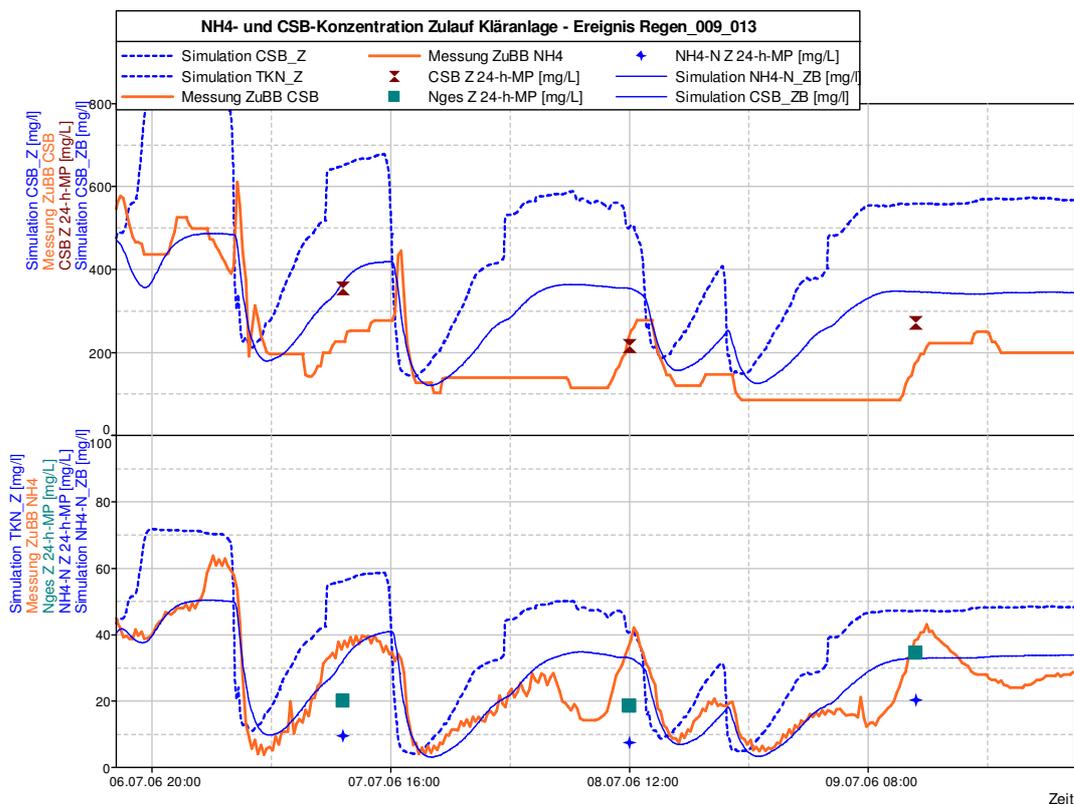


Bild 3.17 Vergleich der gemessenen und simulierten Konzentrationsganlinien

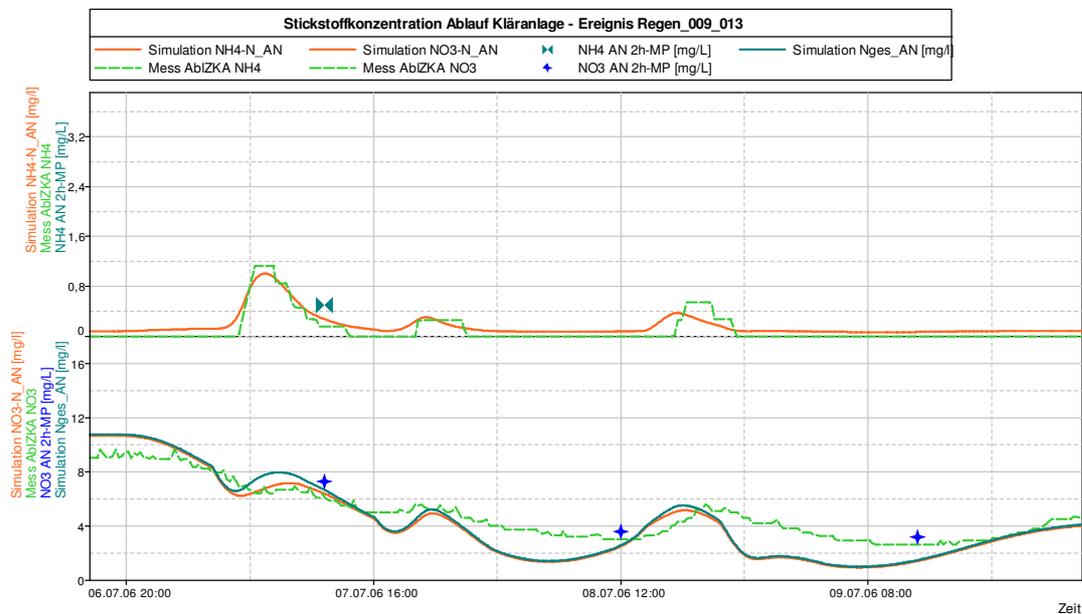


Bild 3.18 Stickstoffkonzentrationen im Kläranlagenablauf: Mess- und Simulationsergebnisse des gekoppelten Gesamtmodells

Bericht DBU-Projekt Phase 2

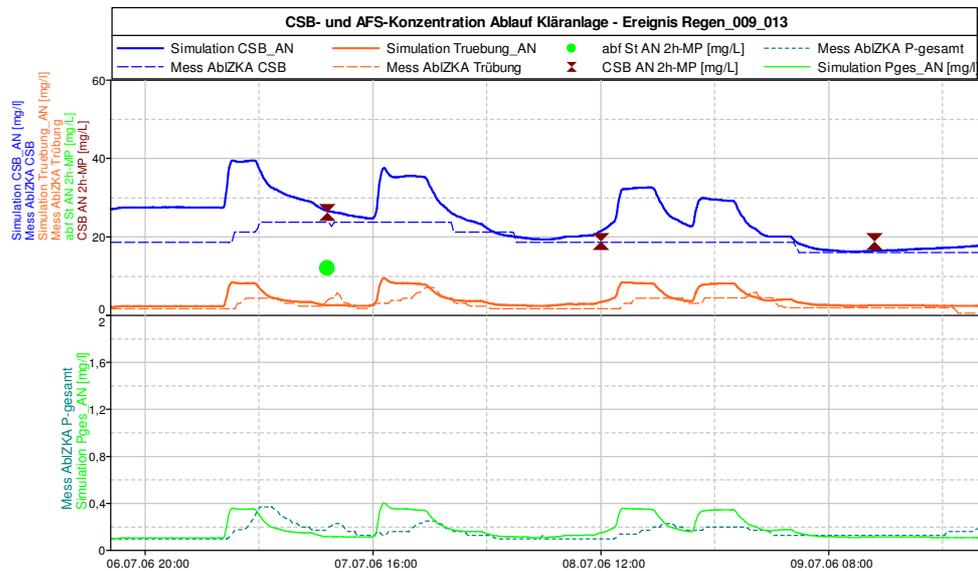


Bild 3.19 Konzentrationen partikulärer Stoffe im Kläranlagenablauf: Mess- und Simulationsergebnisse des gekoppelten Gesamtmodells

Bild 3.19 zeigt die Parameter mit Feststoffanteilen im Ablauf der Nachklärung. Eine Gegenüberstellung ist sowohl bei CSB, Trübung als auch beim P_{ges} nicht einfach bzw. nur begrenzt zulässig:

- Der gemessene CSB ist aufgrund des Messprinzips (SAK) nur bedingt tauglich, Feststoffanteile zu erfassen. Es ist zu erkennen, dass die Dynamik der Trübungs-sonde vom CSB-Messgerät nicht abgebildet wird. Die grundsätzliche Größenordnung bei Trockenwetter ist zwischen Simulation und Messung in Ordnung.
- Der P_{ges} und auch die Trübung sind keine Parameter des verwendeten Modells ASM1. Diese wurden ersatzweise empirisch aus vorhandenen partikulären Fraktionen des Modells ermittelt, um für den Entwurf des Reglers, bei dessen Einsatz in der Großtechnik diese Messwerte als Störgrößen fungieren sollen, realitätsnahe Ersatzwerte zu erhalten. Die Größenordnung ist für diesen Zweck ausreichend. Auffallend ist die nicht deckungsgleiche Spitze, d.h. das Modell hat ca. 2h vor dem realen System Probleme mit der Absetzleistung in Form von erhöhten Feststoffen im Ablauf der Nachklärung. Beim Modell ist dies unmittelbar an den erhöhten Zufluss gekoppelt, in der Realität treten die „Störungen“ erst später auf.

Bild 3.20 verdeutlicht die Ursachen. Der NK-Modellblock von Takács, mit dem die oben gezeigten Ablaufwerte simuliert wurden, reagiert nur auf den Anstieg des Zuflusses. Der gemessene Anstieg des Schlammspiegels im Verlauf des Ereignisses kann nicht abgebildet werden. Hier ist das Modell von Otterpohl-Freund besser, jedoch kann mit diesem der Trockenwetterzustand nicht nachgebildet werden.

Bericht DBU-Projekt Phase 2

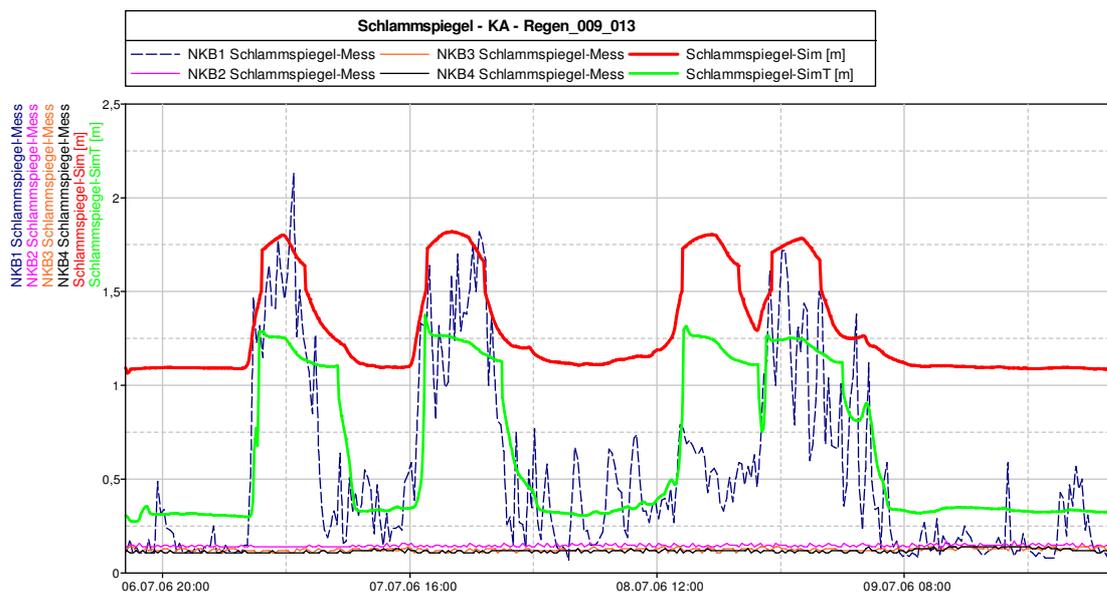


Bild 3.20 Simulation (Otterpohl-Freund (Sim) und Takács (SimT)) und Messung der Schlamm Spiegelhöhe

Statistische Auswertung der Modellgüte anhand Gütekriterien

Zur Überprüfung der Simulationsgüte wurden mehrere statistische Tests entsprechend der Empfehlungen der Hochschulgruppe Simulation durchgeführt und ausgewertet (Ahnert et al., 2007).

Der **Korrelationskoeffizient R^2** kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen und ist ein Maß für die Phasenähnlichkeit von Mess- und Simulation, wobei ein $R^2 = 1$ absolute Phasenähnlichkeit widerspiegelt. Er ist nicht sensitiv für additive oder proportionale Differenzen.

Bei der **linearen Regression** wird der Zusammenhang zwischen Mess- und Simulationswerten als Geradengleichung ($E=a*M+b$) dargestellt. Die Modellqualität ist hoch, wenn die Steigung (a) nahe 1 und der Schnittpunkt (b) mit der Y-Achse nahe 0 sind.

Der **Coefficient of Efficiency E** ist das Verhältnis des mittleren quadratischen Fehlers zur Varianz der Messwerte und ergibt Werte zwischen $-\infty$ und +1. Ein Wert von null bedeutet, dass der quadratische Fehler der Varianz der Messwerte entspricht und die Qualität des Modells dem des Mittelwertes der Beobachtungen der Vorhersage entspricht. Werte nahe 1 entsprechen einer sehr hohen Modellqualität.

Wie aus den Ergebnissen (siehe Tab. 3.3) der statistischen Analyse ersichtlich, sind die Simulationsergebnisse für den Kläranlagenzufluss sowie für die Stickstoffkonzentrationen befriedigend. Kritisch zu betrachten sind die Ergebnisse für den CSB sowie für den

Bericht DBU-Projekt Phase 2

Schlamm Spiegel mit dem OF-Nachklärer. Der Coefficient of Efficiency liegt hier unter 0, was bedeutet, dass der mittlere relative Fehler bei Verwendung des Mittelwerts kleiner ist als bei Verwendung der Simulation. Dies kommt beim Schlamm Spiegel dadurch zu Stande, dass die Kalibrierung bewusst auf die Spitzen ausgerichtet wurde, während für die Trockenperioden eine deutliche Abweichung in Kauf genommen wurde.

Tab. 3.3 Simulationsgüte der relevanten Parameter unter Verwendung verschiedener Gütekriterien

Parameter	Q _{ZU}	CSB _{ZB}	NH ₄ -N _{ZB}	CSB _{AN}	NH ₄ -N _{AN}	NO ₃ AN	N _{ges,AN}	SSp OF	SSp T
	m ³ /h	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	m	m
Mittelwert (Mess)	4.485	207	24,6	19,3	0,10	4,88	4,98	0.54	0,54
Mittelwert (Simu)	4.623	303	26,2	24,6	0,16	4,19	4,36	1.29	0,65
Median (Mess)	3.520	174	22,8	18,6	0,01	4,30	4,40	0.37	0,37
Median (Simu)	3.160	341	31,0	24,7	0,09	3,59	3,69	1,14	0,35
Pearson's Correl. Coeff. R ²	0,93	0,45	0,76	0,49	0,87	0,91	0,91	0,63	0,58
lineare Regr., Parameter a (E=aM+b)	1,08	0,53	0,84	1,63	0,75	1,37	1,35	0,44	0,63
lineare Regr., Parameter b (E=aM+b)	-200	194	5,59	-6,82	0,08	-2,48	-2,39	1,06	0,31
Coefficient of Efficiency E	0,72	-0,22	0,54	-1,40	0,39	0,31	0,36	-1,0	0,33

Beim CSB muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Messung ebenfalls fehlerbehaftet ist, da der SAK die partikulären Bestandteile des CSB nur unzureichend erfasst (Häck et al., 1999). Die Simulation zeigt z.B. im Ablauf deutliche peaks während des oben betrachteten Zeitraumes, die in den Messwerten nicht erscheinen. Die Trübungswerte deuten jedoch auf einen Anstieg der partikulären Stoffe hin. Ein Vergleich ist nur bedingt zulässig.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass Abweichungen zwischen Messung und Simulation unvermeidbar sind, jedoch ist die erreichte Größenordnung insgesamt sehr zufriedenstellend und erlaubt weitergehende simulative Untersuchungen für den Entwurf des Regelungskonzepts.

Bericht DBU-Projekt Phase 2

3.4 Simulative Lastfallstudie

3.4.1 Ziele und Vorgehensweise

Im Rahmen der 2. Projektphase wurde analog zur 1. Phase eine simulative Lastfallstudie durchgeführt. Es wurden Regenereignisse aus dem Jahr 2006 ausgewählt, für die aufgrund der erhöhten Anzahl an Regenschreibern nun auch eine ungleichmäßige Überregnung erfasst und somit die Simulationsqualität neben den Modellerweiterungen (s. Kap 3.2) verbessert werden konnte. Mit der simulativen Lastfallstudie wurde im Gegensatz zur ersten Projektphase (Potential zur Frachtreduktion aufzeigen) das Ziel verfolgt, einen Test der Funktionsweise und der Zuverlässigkeit des entworfenen Reglers durchzuführen. Dabei soll z.B. geprüft werden, ob die Umsetzung des Reglers in Fuzzy korrekt ist und eine Drosselung des Zuflusses erfolgt, wenn Probleme auf der Kläranlage auftreten.

Die Simulationen mit dem Gesamtmodell werden an den ausgewählten Regenereignissen (Kap. 3.4.2) mit drei verschiedenen Zuflusseinstellungen simuliert. Neben der gesteuerten (RTC) werden Varianten mit max. 2.625 l/s (IST-Zustand) und 3.056 l/s als maximaler Zufluss berechnet und die Ergebnisse verglichen. Tab. 3.4 zeigt die für jedes Regenereignis simulierten Varianten der Zuflusseinstellung zur Kläranlage mit den dazugehörigen Modell-Inputs.

Tab. 3.4 Hydraulische Lastfälle bei der Studie mit realen Regenereignissen

IST	$Q_{Z,max}$ 2625 l/s = 9450 m ³ /h;	Messwerte für Q_{RZ} , Q_{RS} , T, $Q_{ÜS}$, O_2
3056	$Q_{Z,max}$ 3056 l/s = 11002 m ³ /h	Messwerte wie bei IST; jedoch $Q_{RZ} + Q_{RS}$ bei Mischwasser mit SIMBA-interner Regelung bezogen auf
RTC	$Q_{Z,max}$ 2625 – 3056 l/s	Q_Z

3.4.2 Ausgewählte Regenereignisse

Mit den parallel simulierenden Modellen und dem Regelkonzept für den Zufluss wurden in der 1. Projektphase fünf verschiedene Regenereignisse aus 2004 gerechnet und ausgewertet (s. Abschlussbericht 1. Projektphase). In der 2. Phase wurden 6 weitere Ereignisse aus 2006 hinzugenommen. Tab. 3.5 zeigt wesentliche Informationen zu den gewählten Ereignissen. Die angegebene Häufigkeit wurde für die Ereignisspitzen nach Reinhold ermittelt. In der Spalte „Probleme KA“ sind die Parameter im Ablauf der Kläranlage aufgeführt, die kritische Konzentrationen im Hinblick auf die Überwachungswerte erreicht haben.

Bild 3.21 zeigt exemplarisch zwei Regenereignisse aus 2006 mit den drei verschiedenen Zulaufstufen (IST = 2625 l/s, MAX = 3056 l/s, RTC) sowie den dabei resultierenden Klärüberlauf am RÜB Kläranlage.

Bericht DBU-Projekt Phase 2

Tab. 3.5 Ausgewählte, reale Regenereignisse

Nr.	Zeitraum Anfang	Ende	Gesamtdauer	Beschreibung	N [mm]	Häufigkeit [a ⁻¹]	Probleme KA
Regenereignisse Projekt-Phase 1 (Kennung_a (alt))							
005_a	19.4.2004 5:50	19.4.2004 7:50	2h	Sehr kurz, mittlere Intensität	7,1	15,1	n.e.
010_a	31.5.2004 14:00	01.6.2004 12:00	22h	Mittel lang, mittlere Intensität	27,5	17,0	n.e.
012-014_a	01.7.2004 11:15	05.7.2004 15:30	3 Einzelereignisse <1d	Kurz-mittel, starke Intensität	8,5; 11,3; 11,6	18,4; 8,2; 15,7	n.e.
015_a	8.7.2004 18:05	9.7.2004 3:40	9h 35min	Kurz, sehr stark	36,5	0,7	n.e.
025_a	26.10.2004 5:15	27.10.2004 6:30	1d 1h	Lang, sehr schwach	13,7	32,7	n.e.
Regenereignisse Phase 2							
009	7.7.06 15:25	7.7.06 17:40	2h 15min	Sehr kurz, sehr stark	30	1,0	kein
011	6.6.06 13:05	6.6.06 16:45	3h 40min	Kurz, stark	7,7 ¹	4,9	N _{gel} , (P _{ges})
013	8.7.06 6:55	9.7.06 2:25	19h 30min	Mittel lang, stark	14,8 ¹	2,4	Kein
015	26.5.06 17:00	28.5.06 9:45	1d 17min	Lang, stark	35,1 ¹	4,4	Kein
048	15.02.2006 16:30	21.02.2006 21:20	06 d 04:50	Sehr lang mit Pausen, sehr schwach, Nachlauf	6 ^{1,2}	40	N _{gel} , P _{ges} , Trüb
054	9.3.06 1:45	10.3.06 7:55	1d 6min	Lang, sehr schwach, lange Nachlaufzeit	19 ^{1,2}	48	P _{ges} , Trüb

¹ Mittelwert aus den Regensummen Regenschreiber DWD und auf KA-Gelände

² Aufgezeichnete Regensummen deutlich zu gering. Starke ungleichmäßige Überregnung!

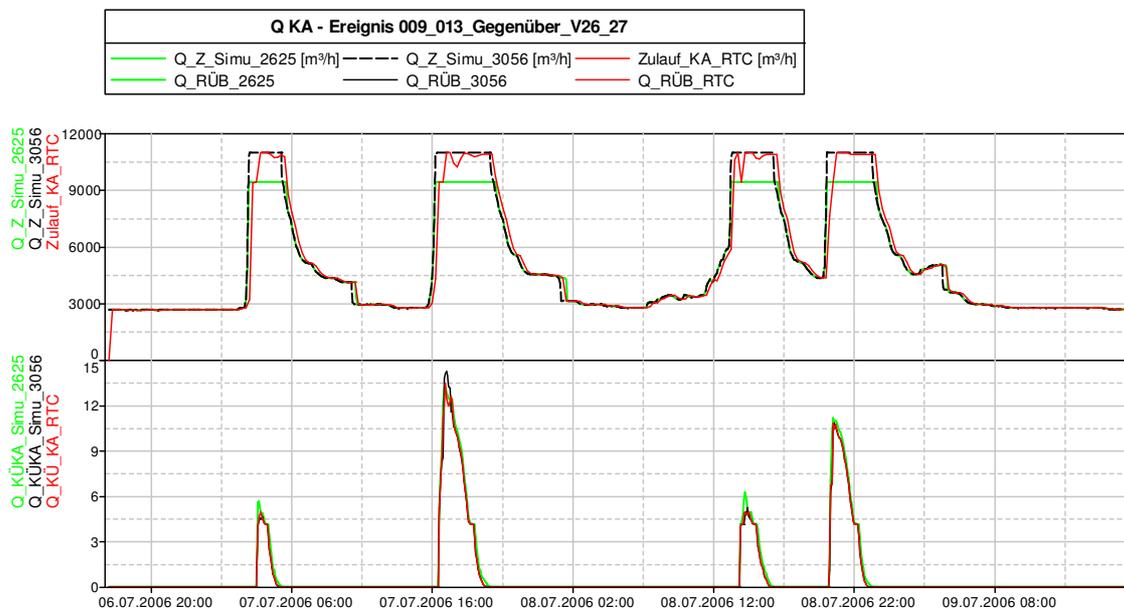


Bild 3.21 KA-Zufluss und Entlastung aus RÜB an der KA, Regen 009 und 013

3.4.3 Ergebnisse

Im Abschlussbericht der 1. Phase sind die Ergebnisse der Simulationsstudie an den Regenereignissen aus 2004 ausführlich dargestellt und wesentliche Zusammenhänge erläutert (itwh, ISI, 2006). Wesentliches Fazit ist insbesondere die Reduzierung der NH₄-N-Frachten ins Gewässer bei schwächeren und mittleren Regen um bis zu 20% (s. Bild 3.22), während bei Starkregen die vorhandenen Kapazitäten zumeist ausgeschöpft sind und das Regelungspotential somit nur niedrig ist.

Die Ereignisse mit den Regen im Jahr 2006 führten aufgrund der Auswahlkriterien (kritische Zustände!) zu außergewöhnlichen Regen, so dass im geregelten Zustand erwartungsgemäß nur wenig (max. 4%) Fracht reduziert werden konnte. Bei 4 von 6 Ereignissen wurde vom Regler keine höhere Beschickung zugelassen, um die Kläranlage nicht weiter zu belasten (s. auch Kap. 5.4).

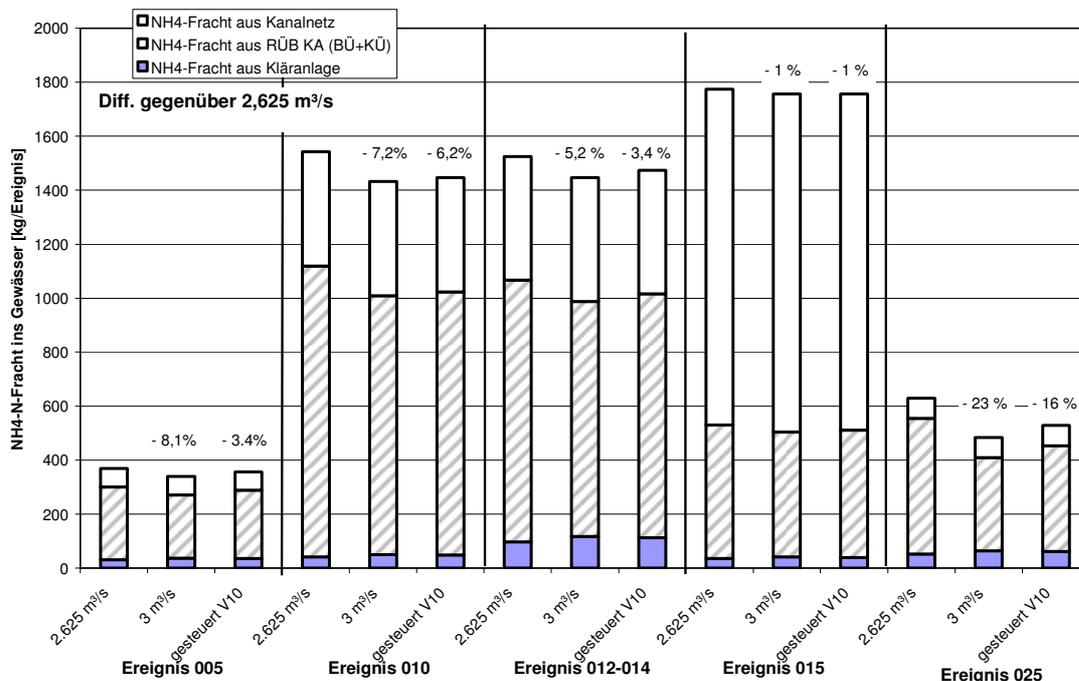


Bild 3.22 NH₄-N-Frachten ins Gewässer für Ereignisse in 2004, Gegenüberstellung der Lastfälle (itwh, ISI, 2006)

4 Belastungsgrenzen der Kläranlage Chemnitz-Heinersdorf im Hinblick auf den Mischwasserzufluss

4.1 Bearbeitungskonzept

Wesentliche Voraussetzung für eine optimierte Mischwasserbelastung der Kläranlage ist die Beachtung und Einhaltung technologischer und technischer Grenzen.

In Zusammenarbeit mit dem Betreiber, den Stadtwerken Chemnitz (SWC), wurden alle bau- und maschinentechnischen Limitierungen für eine hydraulische und stoffliche Höherbelastung identifiziert (Kap. 4.2).

Limitierungen, die sich aus der aktuellen Kläranlagenleistungsfähigkeit ergeben, wurden anhand detaillierter Datenauswertungen zum Verhalten der jeweiligen Reinigungsprozesse ermittelt (Kap. 4.3 bis 4.5). Durch die Überführung in sinnvolle Störgrößen und deren Einbindung in das Regelungskonzept wurden diese dynamischen Belastungsgrenzen berücksichtigt (Kap. 5). Grundsätzlich ist anzumerken, dass in ca. 80% der Zeit von 2004 bis 2006 nur 5 der 6 Belebungsbeckenstraßen in Betrieb waren.

4.2 Untersuchung bautechnischer Limitierungen

4.2.1 Datengrundlagen

Zur Untersuchung der hydraulischen Leistungsfähigkeit der Bauwerke, Verbindungsleitungen und maschinentechnischen Ausrüstung der Kläranlage stehen neben den Informationen vom Betreiber folgende Informationsquellen zur Verfügung:

- Hydraulische Berechnung, Ingenieurbüro für Wasserbau und Umweltplanung, IWU GmbH (2002/2003)
- Messdaten (Tab. 2.7, Tab. 2.8) für den Zeitraum 2004 - 2006

4.2.2 Becken, Verteiler- und Verbindungsbauwerke

In den hydraulischen Berechnungen des IWU (2002/2003) wird aufgezeigt, wie viele Becken bzw. Anlagenteile bei einem Maximalzufluss zur Kläranlage von 9.450 m³/h gleichzeitig außer Betrieb genommen werden können (Tab. 4.1). Bei Außerbetriebnahme weiterer Anlagenteile kommt es entweder zu Rückstau und einer Störung der Verteilung auf die verbleibenden Beckenstraßen oder zum Überlaufen von Anlagen. Im Umkehrschluss lässt sich ableiten, wie hoch die maximale hydraulische Leistungsfähigkeit je Anlagenteil ist. Ergänzend wurden anhand der Angaben und Pläne des IWU als kritisch identifizierte Anlagenelemente sowie Verbindungselemente überschlägig nachgerechnet. Die Ergebnisse sind in Tab. 4.2 aufgeführt.

Bericht DBU-Projekt Phase 2

Tab. 4.1 Hydraulische Belastbarkeit wesentlicher Anlagenteile nach IWU
(2002/2003)

Anlagenteil	Vorhandene Anzahl	Minimal nötige Anzahl bei 9.450 m ³ /h	Faktor	max. KA-Zufluss [m ³ /h]
Geröllfang	3	2	1,5	14.175
Rechen	3	2	1,5	24.175
Sandfang	4	2	2	18.900
Vorklärbecken	4	2	2	18.900
Belebungsbecken	6	4	1,5	14.175
Nachklärbecken	4	3	1,33	12.597

Tab. 4.2 Hydraulische Belastbarkeit sonstiger Bauwerke (eigene Berechnung)

Bauwerk	Element	Ident	Überstau ab ca.	Anmerkungen
Vor Sandfang	Überfall in Einlaufkammer	U_1S4	56.700 m ³ /h	Rückstau in Ablaufgerinne Rechen G_5R3; Überlauf hier bei > 300 % Q _{RW}
Verteiler 1	Überfall in Einlaufkammer	U_11V1	56.700 m ³ /h	
Verteiler 2	Überfall in Einlaufkammer	U_1V2	56.700 m ³ /h	
Verteiler 3	Überfall in Einlaufkammer	U_11V3	16.065 m ³ /h	Rückstau in Gerinne, Prallwand in BB (G_B1K8, W_B1K8)
Ablaufrinne NKB		S_1N1	18.900 m ³ /h	
Ablaufgerinne vor Einbindung RÜB		G_3AB	18.900 m ³ /h	

Bei Betrieb aller Anlagenteile wäre demnach die Nachklärung mit 12.600 m³ limitierend. Da aus technologischen und Wartungsgründen häufig nur 3 Vorklärbecken und 5 Belebungsbecken genutzt werden, reduziert sich die verfügbare hydraulische Kapazität der Belebungsstufe in diesem Fall auf ca. **11.800 m³/h**.

Nach Aussagen des Betreibers kam es vor allem am Rechen bei hohen Mischwasserbelastungen und gleichzeitig hoher Feststofffracht zeitweise zu Betriebsausfällen der **Rechenanlage**. Diese wird in diesem Fall umfahren. Bei einer derartigen Situation verbietet sich eine Mehrbelastung der Anlage.

Im **Vorklärbecken** sind keine Probleme bei erhöhter hydraulischer Belastung zu erwarten. Allerdings zeigen Erfahrungen auf anderen Kläranlagen, dass bei hohem Trockenstoffgehalt und mineralischem Anteil im Rohwasser mitunter Probleme beim Abzug

Bericht DBU-Projekt Phase 2

des Primärschlammes auftreten. Dies lässt sich in der Regel durch einen vermehrten Schlammabzug beherrschen.

Im **Verteilerbauwerk 1 und 3** wird die Verteilung des Abwasserstromes auf die nachfolgenden Becken nicht gesteuert. Nach Aussagen des Betreibers ist davon auszugehen, dass es bei einer hydraulischen Überlastung zu Ungleichverteilungen kommen wird. Bei hohen Wasserständen im Verteilerbauwerk zur Nachklärung (Verteiler 3) kann die Zahnschwelle und die Skimm-Rinne überstaut werden sowie der Schwimmschlamm-sammelschacht überlaufen. Dieses Phänomen tritt bei mehreren Kläranlagen auf, ohne dass dies zwangsweise zu betrieblichen Problemen führt. Allerdings kann damit ein verstärkter Abtrieb von Schlammflocken verbunden sein.

Im **Verteiler 2** erfolgt die Gleichverteilung auf die Belebungsbecken MID-gesteuert mittels unterströmter Schütze. Hier sind keine Probleme zu erwarten.

Da die Schlammwässerung permanent und ohne Zwischenspeicher arbeitet, muss das Schlammwasser auch bei Mischwasserbedingungen eingeleitet werden.

4.2.3 Pumpen

Die Leistungsfähigkeit der auf der Anlage vorhandenen Pumpen ist in Tab. 4.3 aufgeführt (Planunterlagen und ergänzende Informationen des Betreibers).

Tab. 4.3 Leistungsfähigkeit der Pumpen

	Sandfang → VK	Rezirkulation	Rücklaufschlamm
Aggregatzahl je Straße (+ Reserve) [-]	5 (+1)	2 (+1 Handbetrieb)	Insgesamt: 4 (+1)
Kapazität je Aggregat [m ³ /h]	2.440 (neu)	1.350	2.000
Gesamtkapazität (mit Reserve) [m ³ /h]	Ca. 11.000	24.300 (6 BB) 20.250 (5 BB)	8.000
Regelbereich bis [m ³ /h]	ca. 11.000	12.960	6.480 + Hand

Die Pumpen zwischen Sandfang und Belebung haben unter Vernachlässigung einer Reservepumpe eine rechnerische Gesamtförderleistung von 12.200 m³/h. Nach Aussagen des Betreibers beträgt die tatsächliche Förderleistung aufgrund von Verschleißerscheinungen nur ca. **11.000 m³/h**. Die zusätzlich vorhandene Reservepumpe soll für Notfälle zur Verfügung stehen und wird deshalb nicht berücksichtigt.

Die maximal mögliche **Rücklaufschlammförderung** ist auch bei einem Zufluss von 11.000 m³/h mit einem Verhältnis von 0,73 ausreichend.

Bericht DBU-Projekt Phase 2

Die Überprüfung der **Förderleistung der Rezirkulation** muss im Hinblick auf die Randbedingungen der Denitrifikation differenziert in Abhängigkeit von der TKN-Zulaufkonzentration und der aktuellen Nitratkonzentration im nitrifizierenden Teil des Belebungsbeckens betrachtet werden. Hierfür wird die bereits in der ersten Projektphase eingeführte dynamische Massenbilanzierung aufgegriffen und für den Prozess der Denitrifikation aufgestellt. Ergänzend wurden folgende Annahmen getroffen:

- Die DN-Kapazität und die DN-Rate sind nicht limitierend
- Der Stickstoffeinbau in die Biomasse wird durch die Stickstofffreisetzung durch Biomassezerfall ausgeglichen (kein N-Einbau, ungünstige Annahme)
- Nur innerhalb des Nitrifikationsbeckens findet vollständige Durchmischung statt. Die Denitrifikationszone und das Nachklärbecken stehen nicht als Misch- und Ausgleichsbecken zur Verfügung.

Damit lässt sich die Änderung der Nitratmenge im Belebungsbecken mit Gleichung (6) abschätzen.

$$V \cdot \frac{\partial \text{NO}_3 \text{N}_{\text{BB}}}{\partial t} = Q_{\text{zu}} \cdot \text{NO}_3 \text{N}_{\text{zu}} - Q_{\text{RC}} \cdot \text{NO}_3 \text{N}_{\text{BB}} + Q_{\text{RS}} \cdot \text{NO}_3 \text{N}_{\text{NK}} - (Q_{\text{zu}} + Q_{\text{RC}} + Q_{\text{RS}}) \cdot \text{NO}_3 \text{N}_{\text{BB}} - r_{\text{DN}} \cdot V_{\text{DN}} + r_{\text{N}} \cdot V_{\text{N}} \quad (6)$$

Zur Umwandlung in eine Differenzgleichung wurde von einer konstanten hohen TKN-Zulaufkonzentration über 1 Stunde ausgegangen. Als maximale Pumpenleistung wurde die maximal mögliche Rezirkulationsleistung bei Betrieb von 5 Belebungsbecken und unter Verwendung der Reserveaggregate (20.250 m³/h) zuzüglich der maximalen Rücklaufschlammförderung (6.480 m³/h) verwendet.

Damit ergibt sich für die Einhaltung des N-Überwachungswertes von 16,5 mg/L die in Bild 4.1 dargestellte maximale Beschickung. Es ist zu erkennen, dass nur bei hohen Nitratkonzentrationen im Ablauf Belebung und gleichzeitig hohen TKN-Zulaufkonzentrationen eine Mehrbeschickung kritisch sein kann. Dieser Zustand kann ggf. zu Beginn von Starkregenereignissen nach einer langen Trockenwetterperiode auftreten. Im Jahr 2006 traf dieser Zustand auf weniger als 1% aller Messwerte zu, jedoch immer bei sehr niedrigen Kläranlagen-Zuflüssen. Eine hydraulische Begrenzung der Denitrifikation kann bei der gegenwärtigen Abwasserzusammensetzung ausgeschlossen werden.

Bericht DBU-Projekt Phase 2

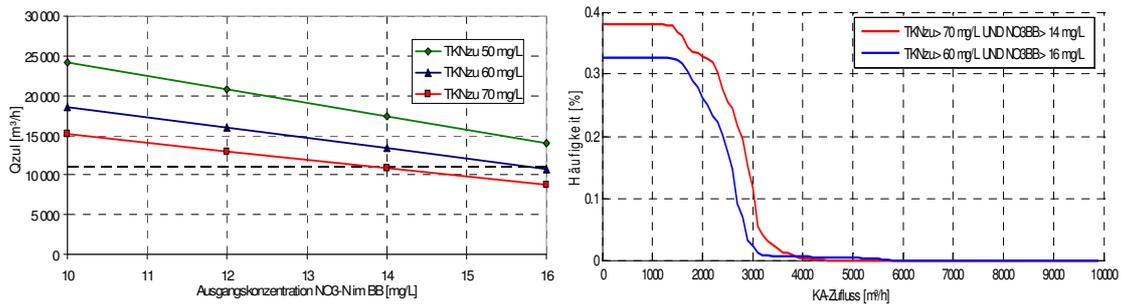


Bild 4.1 Links: $Q_{M,\max}$ als Funktion von TKN_{ZB} und $\text{NO}_3\text{-N}_{\text{AB}}$ bei max. möglichen Q_{RS} und Q_{Rezi} .
Rechts: Häufigkeit des gleichzeitigen Auftretens kritisch hoher TKN-Zu- und Nitrat-Ablaufkonzentrationen

4.2.4 Belüftungskapazität

Mit einem erhöhten Sauerstoffbedarf ist insbesondere am Anfang eines Regenereignisses aufgrund von Ausstoßeffekten aus Kanalisation und Vorklärung zu rechnen. Zur Prüfung einer ggf. limitierenden Belüftungskapazität wurde auf Basis historischer Zulaufdaten (Nov. 2005 – Oktober 2006) die theoretisch erforderliche nach ATV A 131 abgeschätzt und auf Basis des ATV-Merkblatts M 209 in einen Luftstrom umgerechnet.

Die Berechnungen wurden sowohl mit den gemessenen BSB_5 - als auch mit den CSB -Konzentrationen (CSB/BSB_5 -Verhältnis von 2,4) durchgeführt. Die spezifische Sauerstoffausnutzung wurde eher pessimistisch mit $\eta_{\text{O}_2} = 4.3 \text{ \%}/\text{m}$ angenommen.

Die Ergebnisse sind in Bild 4.2 in Form einer Häufigkeitsverteilung zusammengefasst.

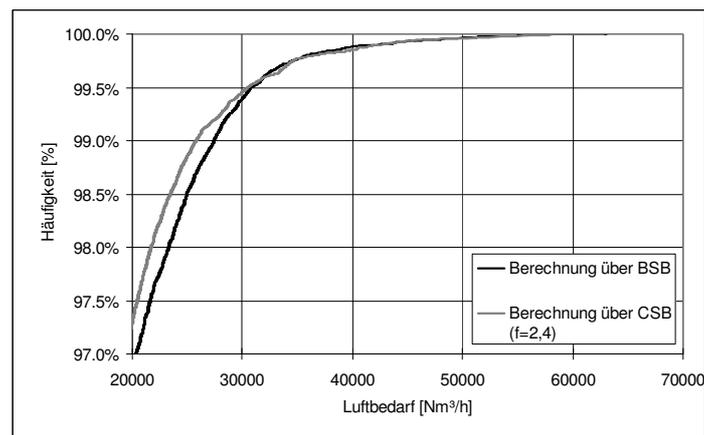


Bild 4.2 Häufigkeitsverteilungen des Luftbedarfs (Nov. 2005 – Dez. 2006)

Im Untersuchungszeitraum wurde die maschinentechnisch **maximal mögliche Luftzufuhr von 61.000 Nm^3/h** je nach Berechnungsgrundlage nur ein- bzw. zweimal für

Bericht DBU-Projekt Phase 2

15 min überschritten. Die visuelle Überprüfung der historischen Daten ergab weiterhin, dass die vereinzelt auftretenden Einbrüche der Sauerstoffkonzentration nicht mit stark erhöhten Zulauffrachten korrelieren und somit auf anderweitige, betriebliche Ursachen zurückzuführen sind.

Als worst-case-Szenario wurde nach der gleichen Methode der Luftbedarf für Lastfälle berechnet, für die der maximale Regenwetterabfluss von 11.000 m³/h mit stark erhöhten Trockenwetterkonzentrationen im Zulauf der Kläranlage überlagert ist. Es wurden folgende Annahmen getroffen:

- CSB/BSB₅-Verhältnis: 2
- zeitgleiches Auftreten der CSB- und Ammonium-Spitze.
- Abwassertemperatur: 20 °C.
- spezifische Sauerstoffausnutzung: Szenario 1: gealterte Membranen $\eta_{O_2} = 4.3 \text{ \%}/m$, Szenario 2: neue Membranen $\eta_{O_2} = 6.0 \text{ \%}/m$

Wird von einer schlechteren Sauerstoffausnutzung ausgegangen ($\eta_{O_2} = 4,3 \text{ \%}/m$), so würde es ab dem 88%-Perzentil der CSB und NH₄⁺-Konzentrationen, kombiniert mit dem maximal regelbaren Zufluss ($Q_{zu} = 11.000 \text{ m}^3/h$), zu einer Überschreitung der Gebläsekapazitäten kommen. Im Zuge von Instandsetzungsmaßnahmen auf der KA Chemnitz wird gegenwärtig das Belüftungssystem abschnittsweise erneuert. Nach Abschluss der Arbeiten ist von einer guten Sauerstoffausnutzung ($\eta_{O_2} = 6,0 \text{ \%}/m$) auszugehen. In diesem Fall ist auch bei einer Mehrbeschickung der Anlage nie mit einer Überschreitung von der BelüftungsKapazität zu rechnen.

4.2.5 Generelle Probleme im Zulaufbereich der KA

Der Zufluss zur Kläranlage (nach dem Trennbauwerk des Regenüberlaufbeckens) wird über einen Plattenschieber geregelt. Gemäß der Planfeststellung beträgt der maximale Zufluss zur Kläranlage 9.450 m³/h. Messungen im Zeitraum 2004 – 2006 ergaben jedoch höhere maximale 15-Minutenwerte: im KA-Zulauf bis 11.520 m³/h, im KA-Ablauf bis 10.176 m³/h. Diese um bis zu 22 % erhöhten Werte ergeben sich aus dem Regelverhalten des Schiebers (vgl. Kap.2.2). Aufgrund der begrenzten Kapazität des Zwischenpumpwerks sind auch bei kontrollierter Mehrbeschickung der Anlage keine darüber hinaus gehenden Werte zu erwarten bzw. möglich.

Bericht DBU-Projekt Phase 2

4.3 Verhalten der Stickstoffelimination bei Mischwasser

Den nachfolgenden Auswertungen liegen die Messdaten von 2004 bis 2006 zugrunde. Die Umsatzprozesse Nitrifikation und Denitrifikation wurden getrennt untersucht.

4.3.1 Nitrifikation

Gemäß der Ergebnisse verschiedener in der Fachliteratur beschriebener Untersuchungen (vgl. Kap. 1.1) ist die Nitrifikation ein Reinigungsprozess, der bei Mischwasserzuflüssen eine potentielle Schwachstelle darstellt. Dies ist insbesondere auf die hohe anfängliche $\text{NH}_4\text{-N}$ -Fracht-Spitze zurückzuführen, die mit dem aktuell vorhandenen Nitrifikationspotential nicht zu kompensieren ist und in den Ablauf der Kläranlage gelangt.

Zur Beurteilung der Nitrifikation auf der KA Chemnitz wurde der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Messwert (15-min-Wert) im Ablauf der Kläranlage ausgewertet. Bild 4.3 zeigt die Ergebnisse einer Einteilung der Messwerte in Gruppen.

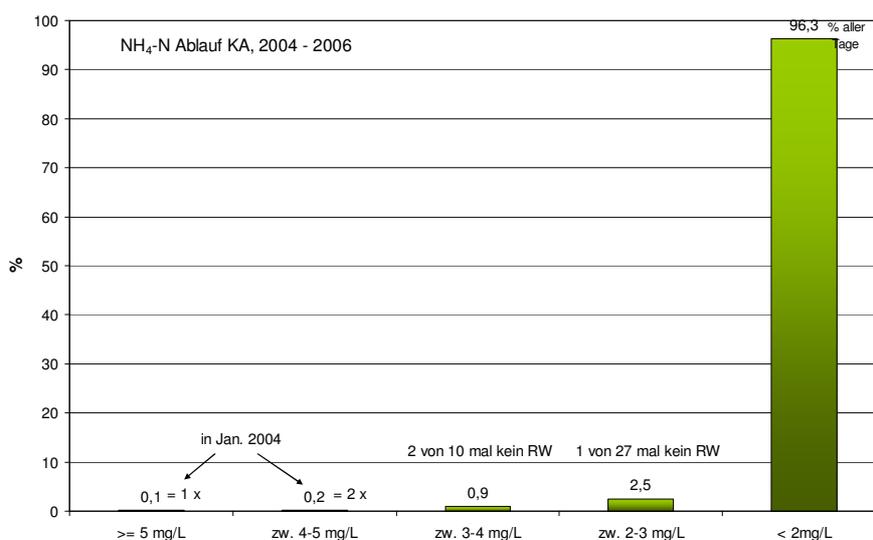


Bild 4.3 Gruppierung der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentrationen im Ablauf der Kläranlage

An 96% aller Tage (inkl. Wintermonate!) ist der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalt kleiner 2 mg/L. Im Mittel beträgt der Wert bei Trockenwetter 0,1 mg/L, d.h. es wird vollständig nitrifiziert. Ausnahmen gab es im Januar 2004, bei denen ungünstige Randbedingungen (sehr hohe zusätzliche industrielle Stickstofffrachten, kalt, nur 5 Straßen) auch bei Trockenwetterbedingungen zu Werten zwischen 4 und 5 mg/L führten.

Die Ereignisse mit erhöhten Konzentrationen zwischen 2 und 4 mg/L sind überwiegend auf Regen zurückzuführen; der einzuhaltende gesetzliche Grenzwert von 5 mg/L wird dabei jedoch nicht überschritten.

Bericht DBU-Projekt Phase 2

Abschließend kann festgestellt werden, dass die Nitrifikation in Chemnitz bei Regenerereignissen auch bei ungünstigen Randbedingungen (Winter, 5 von 6 Straßen) nicht als kritisch einzustufen ist bzw. Werte von ca. 4 mg/L nicht überschritten werden.

Die Betrachtung von Ganglinien bei o.g. Auswertung (vgl. Bild 4.4) zeigt weiterhin, dass die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration im Ablauf der Nachklärung aufgrund einer Vermischung mit dem Nachklärbeckeninhalt abgeflachter bzw. niedriger und zeitlich versetzt gegenüber dem Wert am Ablauf der biologischen Stufe ist.

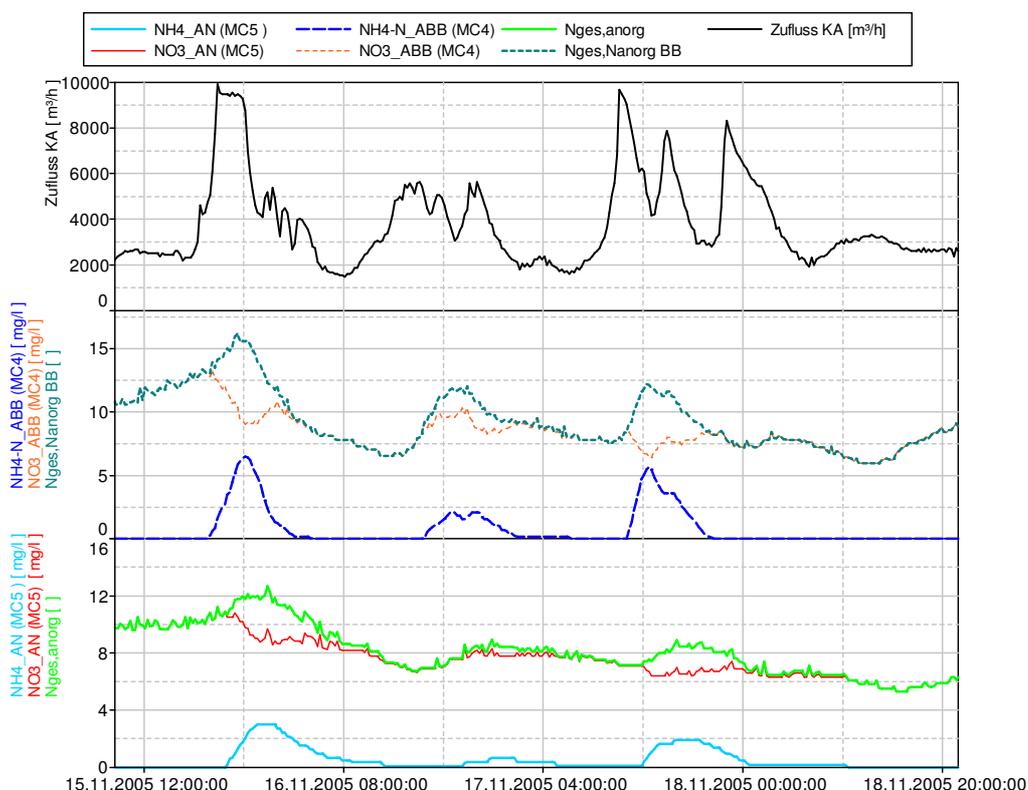


Bild 4.4 Ereignis mit relativ hohen $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration im AN

Dieses erschien als interessante Möglichkeit zur Prognose des relevanten Ablaufwertes durch den Messwert „Ablauf Belebungs“ sowie somit als Störgröße mit Prognosehorizont für das zu entwerfende Regelungskonzept. Die Möglichkeiten einer rechnerischen Vorhersage des Ablaufwertes wurden untersucht, jedoch ist diese aufgrund vieler unbekannter Einflussgrößen nicht möglich. Insbesondere der zum IST-Zeitpunkt nicht bekannte weitere Ereignisverlauf und die Strömungsbedingungen in der Nachklärung führten dazu, dass nur eine „worst case“-Betrachtung herangezogen werden kann (s. Bild 4.5):

Bericht DBU-Projekt Phase 2

- Die Reduktion des Wertes $\text{NH}_4\text{-N}_{\text{ABB}}$ beträgt mindestens 28%
- Der Zeitvorsprung bis zum Durchschlagen des Peaks in den Ablauf der Nachklärung beträgt 45 min.

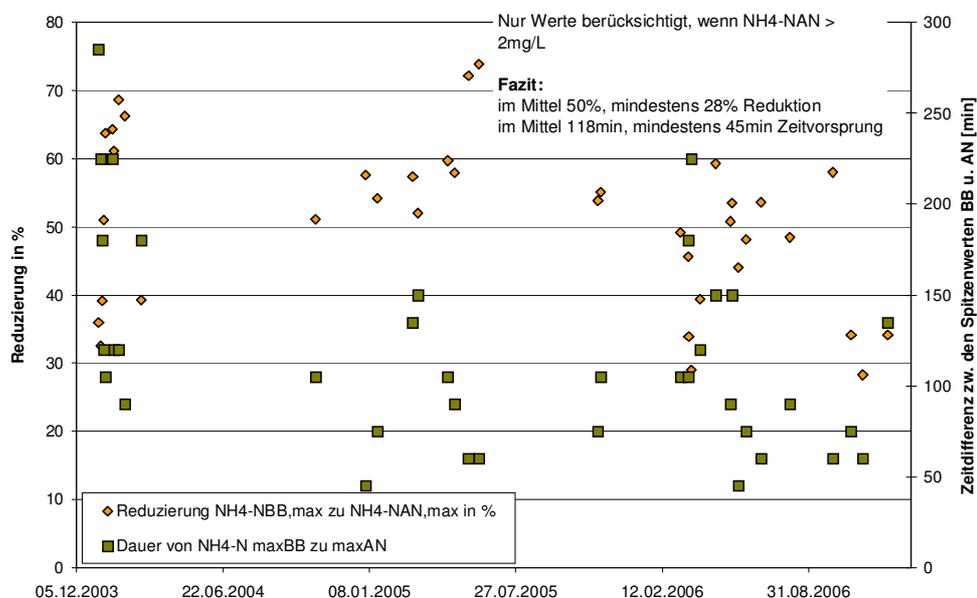


Bild 4.5 Gegenüberstellende Auswertung des $\text{NH}_4\text{-N}$ im Ablauf der Belebungs- und der Nachklärung

4.3.2 Denitrifikation

Ungünstige Einflüsse des Mischwassers auf den Prozess der Denitrifikation sind die Abnahme leicht abbaubarer Kohlenstoffverbindungen und ein erhöhter O_2 -Eintrag in die Denitrifikationszone (Schwentner & Krauth, 1992). Im Allgemeinen werden die Ablaufkonzentrationen aufgrund der einsetzenden Verdünnung jedoch in der Regel nicht erhöht sondern im Ereignisverlauf geringer.

Im Ablauf der Kläranlage Chemnitz liegt die $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentration im Mittel bei 8 mg/L. Bei Mischwasser ist die zuvor beschriebene Verdünnung feststellbar, so dass Konzentrationen unter 4 mg/L auftreten können. Auffällig sind die teilweise bei Trockenwetter auftretenden hohen $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen zwischen 9 und 14 mg/L (s. Bild 4.6). Folgende Ursachen für hohe Nitratwerte bei Trockenwetter sind möglich:

- **Rezirkulation nicht ausreichend:** Rein rechnerisch ist der gemessene Rezirkulationsstrom ausreichend; eventuell sind die Messungen mit „Kanalmäusen“ zu unge-

Bericht DBU-Projekt Phase 2

nau (häufige Verschmutzung), so dass die Regelung nicht korrekt arbeiten kann.

- **O₂-Verschleppung ins Denitrifikationsbecken:** Messdaten zeigen keinen Zusammenhang
- **Substratmangel bzw. ungünstige BSB/TKN - Verhältnisse im Zulauf zur Denitrifikationsstufe:** Insbesondere nach langen Trockenwetterperioden ist das Verhältnis ungünstig; die Stickstoffkonzentration ist vermutlich wegen des dann geringen Fremdwasseranteils sehr hoch (NH₄-N bis 80 mg/L), die Konzentration an Kohlenstoffverbindungen ist aufgrund langer Aufenthaltszeiten in Kanalnetz und Vorklärung eher gering. Weiterhin wird durch die biologische P-Elimination verfügbares Substrat entfernt.
- **Ungünstiger pH-Wert:** Kann ausgeschlossen werden (Werte zwischen pH 6,4-7,9)

Im Rahmen des großtechnischen Untersuchungszeitraums wurde als Sofort-Maßnahme empfohlen, ein weiteres Vorklärbecken außer Betrieb zu nehmen (2 von 4 Becken), so dass die Aufenthaltszeit bei Trockenwetter ca. 1,6 h statt 2,5 h beträgt. Auch mit dieser Maßnahme konnte die Denitrifikation nicht nachhaltig verbessert werden. Das Problem müsste systematisch mit Hilfe von Messungen in verschiedenen Becken (Bio-P, Deni, RS-Deni) untersucht werden.

4.3.3 Gesamter Stickstoff (NH₄-N und NO₃-N) im Ablauf der Kläranlage

Tab. 4.4 zeigt die Ergebnisse der statistischen Auswertung der Stickstoffmesswerte in Form von N_{ges,anorg,AN} und bestätigt die bei der Denitrifikation erwähnten Zusammenhänge mit erhöhten Werten (auch > 16 mg/L) bei Trockenwetter. Die Erhöhung des NH₄-N (bis 5 mg/L möglich) kann in Verbindung mit der noch vor der Verdünnung hohen NO₃-N-Konzentration zu kritischen Werten beim N_{ges} (Grenzwert 16,5 mg/L) führen.

Tab. 4.4 Ergebnisse der statistischen Auswertung des gesamten Stickstoffs im Ablauf der Nachklärung bei Werten > 11 mg/L

N _{ges,anorg}	Anzahl	Mischwasser?	Sonstiges
> 16 mg/L	7	kein MW	z.T. mehrtägige Zeiträume
14 - 16 mg/L	10	davon 4 MW	z.T. mehrtägige Zeiträume, 1.3.-2.3.04, 05.04.2004, 26.05.2006, 06.06.2006
11 bis 14 mg/L	24	davon häufiger MW	Bezogen auf überwachungsrelevanten Zeitraum (außerhalb noch häufiger)

Bild 4.6 zeigt die Dynamik bei einem Mischwasserereignis, bei dem der gesamte, anorganische Stickstoffgehalt auf Werte bis 15,4 mg/L ansteigt, nachdem ein hoher Nitrat-

Bericht DBU-Projekt Phase 2

gehalt aus Trockenwetterbedingungen mit einem $\text{NH}_4\text{-N}$ -peak zusammen trifft.

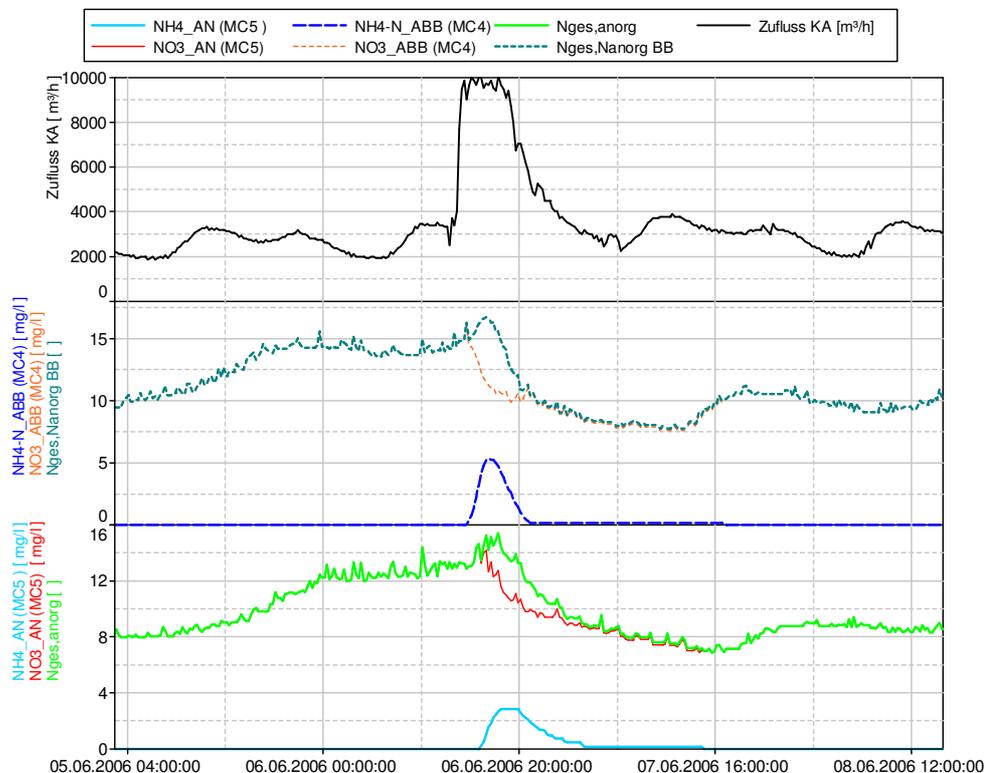


Bild 4.6 Hoher N-Gehalt im Ablauf bei Mischwasser (max. 15,4mg/L)

Aus diesem Grund ist es wichtig, den Nitratgehalt bzw. die Konzentration des gesamten, anorganischen Stickstoffs auch bei Trockenwetter in das Regelungskonzept einzubeziehen.

Bericht DBU-Projekt Phase 2

4.4 Verhalten der Nachklärung bei Mischwasserzufluss

4.4.1 Möglichkeiten zur messtechnischen Erfassung

Die Absetzleistung der Nachklärung kann bei Mischwasserzuflüssen erheblich gestört werden und Suspensaabtrieb zur Folge haben [z.B. ATV, 1997, Seggelke, 2002]. Erkennbar sind solche Störungen anhand von Messwerten im Ablauf der Nachklärung, die überwiegend partikuläre Bestandteile erfassen.

Tab. 4.5 zeigt die auf der KA Chemnitz verfügbaren Online-Messungen im Ablauf der Nachklärung, Trübung, P_{ges} und CSB. Die Beurteilung der Nutzbarkeit der Werte zeigt jedoch, welche Probleme bei der Auswertung auftreten.

Die CSB-Messung erwies sich als nicht brauchbar, da es sich hier um ein optisches Verfahren (SAK) handelt, welches vor allem zur Messung der gelösten Kohlenstoffverbindungen geeignet ist. Die Trübungsmessung widerspiegelt hingegen die partikulären Stoffe, ist jedoch kein einzuhaltender Qualitätsparameter und daher wenig aussagekräftig hinsichtlich der Ablaufqualität. Die Gesamtposphorkonzentration P_{ges} ist als Zielgröße nur mit Einschränkungen verwendbar. Durch den Einbau von Phosphor in die Biomasse wird Schlammabtrieb immer erhöhte Phosphorkonzentrationen im Ablauf zur Folge haben. Eine erhöhte P-Konzentration ist jedoch auch durch Zunahme der gelösten Anteile zu verzeichnen, wenn sich Probleme bei der Fällung ergeben. Ein erhöhter Gesamtposphorgehalt im Ablauf ist somit nicht zwingend mit Schlammabtrieb und damit mit einem Versagen der Nachklärung verbunden.

Statistische Auswertungen und Korrelationsanalysen der mehrjährigen Datenreihen sind aufgrund oben dargestellter Probleme nur eingeschränkt zulässig. In Kombination mit der Trübungsmessung oder dem PO_4 -P im Zulauf zur Nachklärung lassen sich jedoch erhöhte P_{ges} -Ablaufwerte im Hinblick auf Schlammabtrieb interpretieren.

Tab. 4.5 Messwerte Ablauf NK mit partikulären Bestandteilen auf der KA Chemnitz

15-min-Messwert	Beurteilung der Nutzbarkeit
Trübung	Erfasst uneingeschränkt Feststoffe. Nachteilig: schwere Einordnung des Absolutwertes, da keine vergleichbaren Messwerte aus der Laboranalytik vorliegen. Häufiger Messwertedrift und kurzfristige Spitzen durch geringste Verschmutzungen verhindern statistische Auswertung (vereinzelt erhöhte Werte ohne erkennbaren Hintergrund bei TW!).
CSB_{hom}	Kaum nutzbar, da Feststoffe via vorhandene SAK-Sonde nicht richtig erfasst werden
P_{ges}	Eingeschränkt aussagefähig, da großer Anteil aus PO_4 -P kommt, das unabhängig vom Absetzprozess nur durch die P-Elimination beeinflusst wird. Differenzbildung vom 15-min-Messwert PO_4 - P_{ABB} nicht sinnvoll, da zeitlich verschoben wg. Aufenthaltszeit im Becken (dynamisch!).

Bericht DBU-Projekt Phase 2

Weiterhin können auch andere Mess- und Rechenwerte Hinweise auf Probleme geben. Tab. 4.6 zeigt diese sowie die möglichen Ursachen der Störungen.

Tab. 4.6 Ursachen für Störungen des Absetzverhaltens

Ursachen	Erkennbar
Überschreitung der zulässigen Oberflächenbeschickung q_A bzw. Schlammvolumenbeschickung q_{sv} (auch durch ungleichmäßige Beschickung der einzelnen NKB möglich)	Ermittlung q_A , q_{sv}
Hohe Schlamm Spiegel	Schlamm Spiegelhöhe
Ungünstiges Absetz- und Eindickverhalten	VSV, ISV, TS_{RS}
Ungünstige Rücklaufschlammführung	TS-Gehalt im Rücklaufschlamm, Q_{RS}
Hohe Zufluss-Gradienten	$\Delta (Q_{RS}+Q_{ZU}) / \Delta t$

Im Rahmen der 1. Projektphase wurde ab 09/2005 zur besseren Beurteilung des Eindickverhaltens zusätzlich eine TS-Sonde in einem der beiden Rücklaufschlamm-Sammelschächte installiert und eine online Schlammvolumenmessung zuerst durch die TU Dresden und im weiteren Verlauf durch die Stadtwerke Chemnitz betrieben. Die Daten beider Messgeräte wurden regelmäßig ausgelesen und auf Plausibilität geprüft. Die Massenbilanz der TS-Frachten aus der Belebung und im Rücklaufschlamm ergab einen Summenfehler von $< 0,5\%$. Allerdings zeigte die Schlammvolumenmessung erhebliche Schwankungen, welche sich nicht mit kurzfristigen Veränderungen der Schlamm Eigenschaften erklären lassen. Vermutet wird eine Beeinflussung des Absetzverhaltens durch hydraulisch bedingte Schwingungen des Messgeräts.

4.4.2 Auswirkung von Mischwasserereignissen auf die Feststoffparameter

Aus den Messdaten der untersuchten Jahre 2004 bis 2006 konnten folgende Erkenntnisse gezogen werden:

- Es gab 14 Mischwasserereignisse, bei denen P_{ges} im Ablauf der Nachklärung $> 0,9$ mg/L überschritten hat.
- Darunter waren 9 Ereignisse, bei denen die Ursache nicht im PO_4 -P-Anteil lag (d.h. P-Elimination unproblematisch) und somit Absetzprobleme bzw. Schlammabtrieb die Ursache waren. Bei 5 von diesen 9 Ereignissen überschritt $P_{ges,AN}$ den Grenzwert von 1 mg/L.
- Der Messwert CSB_{hom} überschritt nie den Grenzwert von 60 mg/L

Diese erste Datenanalyse verdeutlicht, dass es in der Nachklärung in Chemnitz zu

Bericht DBU-Projekt Phase 2

Problemen beim Absetzverhalten kommen kann. Bild 4.7 und Bild 4.8 zeigen exemplarisch die zwei Ereignisse aus 2006, in denen es zu erhöhten Ablaufwerten bei den Feststoffen gekommen ist.

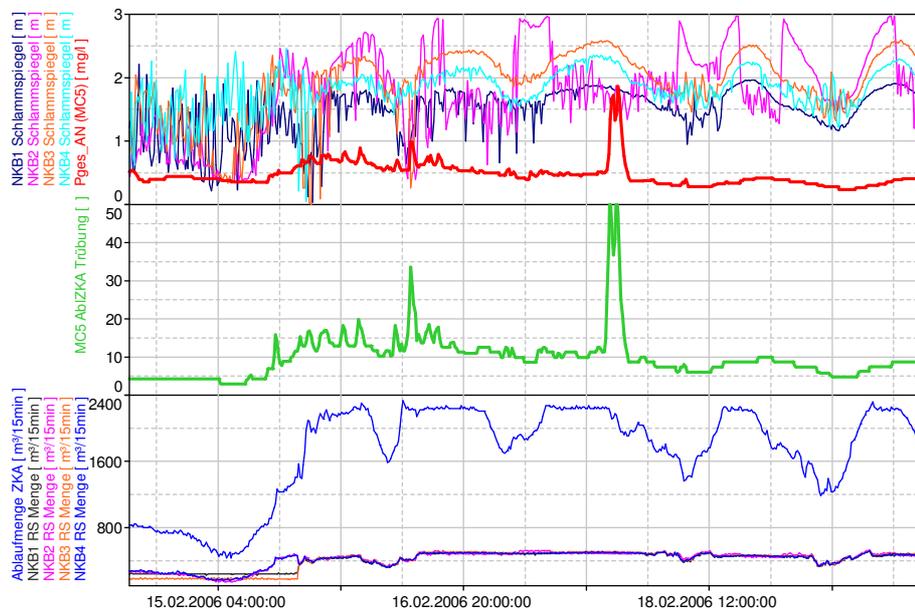


Bild 4.7 Störung des Absetzverhaltens, Regenereignis 17.2.06 (Ereignis 048)

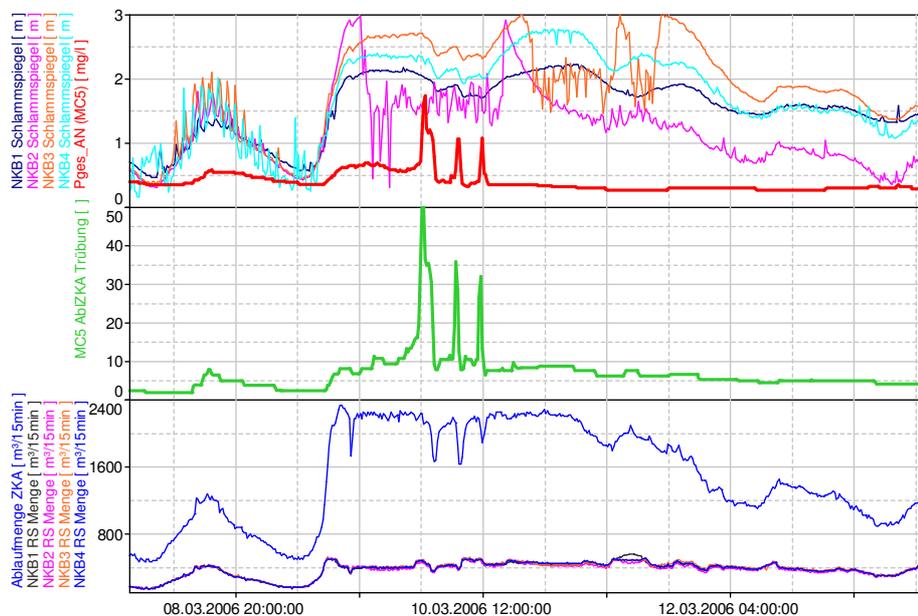


Bild 4.8 Störung des Absetzverhaltens, 9.-13.3.06 (Ereignis 054)

Bericht DBU-Projekt Phase 2

Folgende Auffälligkeiten zeigt die Einzelanalyse der beiden Ereignisse:

- Die Schlamm Spiegelhöhen stellen sich ungleich ein. Die Nachklärbecken werden offenbar ungleich beschickt. Der Abzug des Rücklaufschlamm erfolgt gleichmäßig. Grundsätzlich ist dies ungünstig und kann zu Problemen durch unkontrollierte Überschreitungen der Kapazität führen. Im dargestellten Beispiel sind keine Auswirkungen erkennbar.
- Die Trübungsspeaks setzen erst im Verlauf des Ereignisses, d.h. viele Stunden nach Beginn der erhöhten Belastung ein.
- Probleme treten infolge hydraulischer Zuflussgradienten auf. Auffällig ist, dass nicht alle Gradienten zu Störungen führen, d.h. Ursachen überlagern sich.

4.4.3 Analyse der Ursachen

Die Analyse der Ursachen ist aufgrund o.g. Schwierigkeiten bei den Messwerten (Tab. 4.5) nicht ohne weiteres statistisch möglich. Die in Tab. 4.6 aufgeführten möglichen Ursachen werden daher teilweise anhand von Einzelereignissen und visuellen Kontrollen untersucht.

Einhaltung der zulässigen Beschickungen q_A und q_{sv} ?

Die nach Arbeitsblatt A131 zulässigen Grenzwerte für die **Oberflächenbeschickung** $q_A \leq 1,6$ m/h wurden weit unterschritten (max. 1,2 m/h). Zusammenhänge zu erhöhten Konzentrationen im Ablauf der Nachklärung existieren ebenfalls nicht.

Die zulässige **Schlammvolumenbeschickung** von $q_{sv} \leq 500$ l/(m²*h) wird an insgesamt 5 Regenereignissen im Zeitraum 2004 bis 2006 überschritten (Maximum 577 l/(m²*h)). Bild 4.9 zeigt den Verlauf der Ganglinien im Zeitraum September 2005 bis Ende 2006. Während 2 Ereignisse mit einem q_{sv} von 494 bzw. 577 l/(m²*h) zu erhöhten Suspensa im Ablauf der Nachklärung (wenn P_{part} und Trübung zeitgleich hoch) führten, gab es ebenfalls Ereignisse, bei denen trotz hoher Werte keine Probleme auftraten.

Bild 4.10 verdeutlicht ebenfalls den vorhandenen Zusammenhang zwischen erhöhtem q_{sv} (hier im Tagesmittel) und Problemen der Abtrennleistung. Der Zusammenhang mit $R=0,66$ ist jedoch nur knapp dem Bereich „deutlicher Zusammenhang“ zuzuordnen, d.h. weitere, parallel wirkende Einflüsse müssen vorhanden sein.

Bericht DBU-Projekt Phase 2

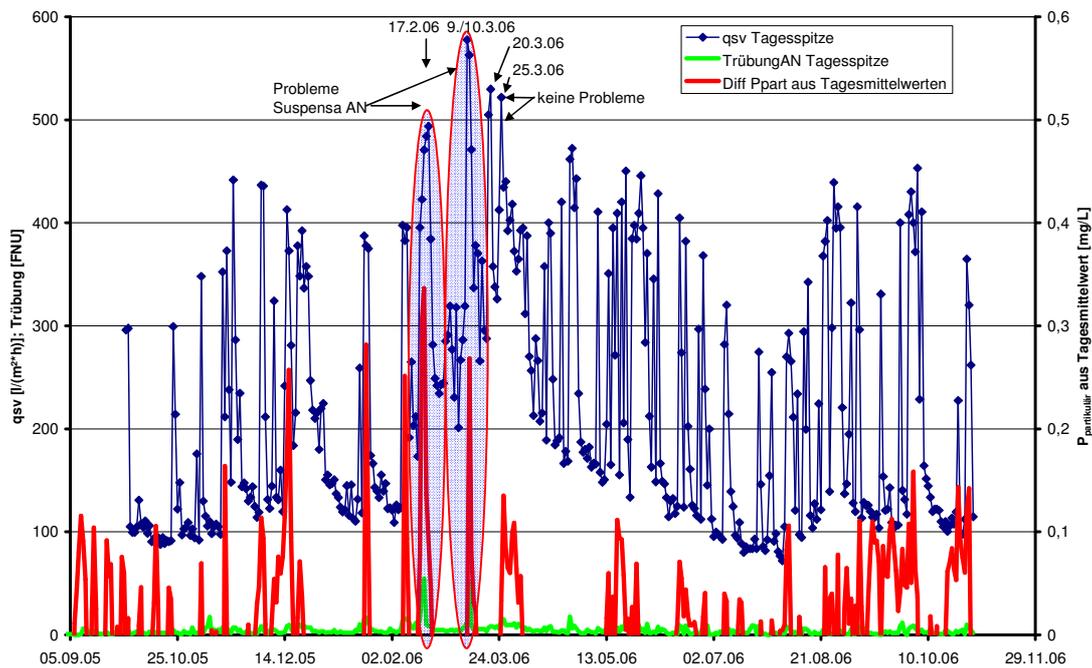


Bild 4.9 Verhalten von q_{sv} , Trübung und dem partikulären P-Anteil ($P_{gesAN} - PO_4 - P_{ZNK}$) im Zeitraum Sep. 2005 bis 2006

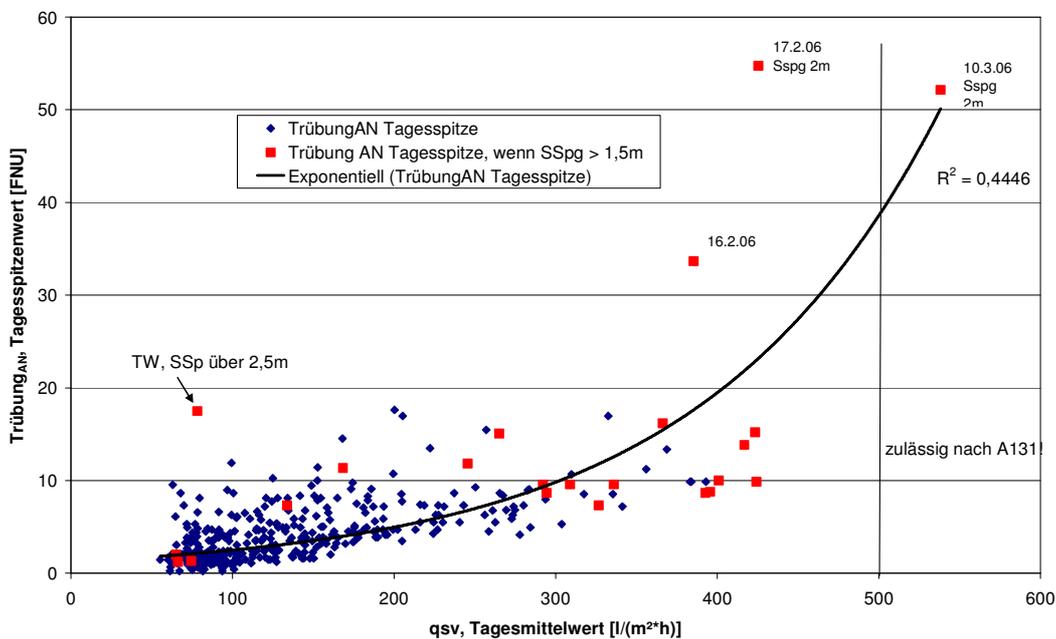


Bild 4.10 Korrelation der Tagesmittelwerte von q_{sv} und Trübung (Zeitraum Sep. 2005 bis Dez. 2006)

Überschreiten die Schlammspiegelhöhen zulässige Werte?

Die Tendenz, dass ein hoher Schlamm Spiegel zu erhöhten Ablaufwerten führen kann, ist ebenfalls in Bild 4.10 zu erkennen. Jedoch ist auch dies kein alleiniger Grund für Betriebsprobleme in der Nachklärung, da auch viele Ereignisse vorhanden sind, bei denen selbst Schlamm Spiegelhöhen über 2 m bei zeitgleichem q_{sv} bis 500 l/(m²*h) (z.B. 20.3.2006) unproblematisch sind. Dies lässt sich mit der Wirkung als Flockenfilter erklären. Die erforderliche Klarwasserzone von mindestens 50 cm (A131) ist dabei immer eingehalten.

Auch die Betrachtung des Einzelereignisses (Bild 4.13) bestätigt, dass die erhöhten Ablaufwerte nicht mit den höchsten Schlamm Spiegelhöhen korrelieren. Es besteht eher der Zusammenhang, dass Schwingungen des Schlamm Spiegels (Armbruster et al., 2001) zu Schlammabtrieb führen.

Ungünstiges Schlammabsetz- bzw. Eindickverhalten?

Sowohl das **Vergleichschlammvolumen VSV** als auch der **Schlammindex ISV** lag in den betrachteten Zeiträumen 2004-2006 mit ≤ 600 m/L bzw. ≤ 165 ml/g (A131: 50-200 ml/g) in den Bereichen, die gemäß ATV A131 erforderlich sind. Für die Anwendbarkeit der Bemessungsregeln sind die Werte, vermutlich wegen der Dosierung eines Kombinationsproduktes aus Aluminium und Polymeren (Fa. VTA), im normalen Bereich.

Die Ganglinien in Bild 4.11 verdeutlichen, dass bei den beiden Ereignissen mit deutlich erhöhten Ablaufwerten ein ISV von knapp unter 150 ml/g vorlag. Weiterhin wird jedoch deutlich, dass auch Mischwasserereignisse bei Schlammindizes bereits zwischen 120 und 150 ml/g zu einem erhöhten partikulären Phosphor-Anteil führen können.

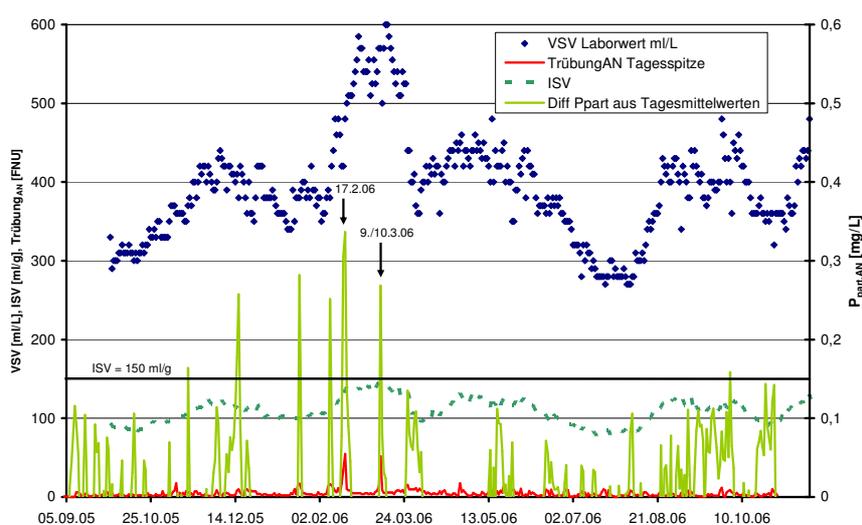
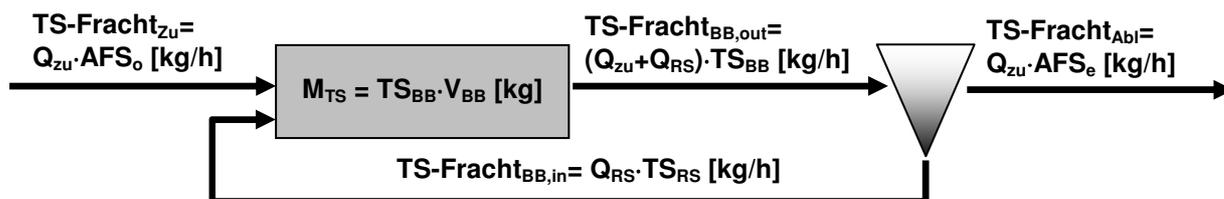


Bild 4.11 Ganglinien von VSV, ISV, Trübung_{AN} und Ppart_{AN}

Bericht DBU-Projekt Phase 2

Ob das Eindickverhalten im üblichen Bereich liegt bzw. ob dieses durch die hydraulische Belastung gestört wird, kann anhand des **TS-Gehaltes im Rücklaufschlamm** untersucht werden. Neben den Messwerten werden mittels theoretischen Betrachtungen analog der Untersuchungen von Seggelke (2002) die Messwerte verifiziert und Variantenrechnungen durchgeführt. Bild 4.12 zeigt zum Verständnis der Zusammenhänge die Schlammströme im System Belebungs- und Nachklärbecken.



Ann. Wachstum = Abzug

Bild 4.12 Schlammströme im Belebungsverfahren

Der TS-Gehalt ($TS_{BB,neu}$) im Belebungsbecken stellt sich je Zeitschritt gemäß Gl. 7 auf Basis einer Massenbilanz der Stoffströme und unter Berücksichtigung des bisherigen TS-Gehaltes in der Belebung ($TS_{BB,alt}$) ein. Es wird deutlich, dass sowohl die in die Belebungsanlage als auch die aus der Belebungsanlage in die Nachklärung beförderte Fracht maßgebend sind für die Veränderung des TS_{BB} , d.h. höhere Rücklaufschlammströme erhöhen zwangsläufig auch die Fracht aus der Belebungsanlage.

$$TS_{BB,neu} = TS_{BB,alt} + \frac{Q_{zu} \cdot AFS_o + Q_{RS} \cdot TS_{RS} - (Q_{zu} + Q_{RS}) \cdot TS_{BB,alt}}{V_{BB}} \cdot \Delta t \quad [g/L] \quad (7)$$

Unter Vorgabe des Zuflusses und des Rücklaufschlammstroms kann der resultierende TS-Gehalt in der Belebungsanlage errechnet werden, wenn der TS-Gehalt im Rücklaufschlamm bekannt ist. Gemäß des Ansatzes nach ATV A131 (2000) resultiert dieser zu:

$$TS_{RS} = 0,7 \cdot TS_{BS} \quad [g/L] \quad \text{mit} \quad TS_{BS(Bodenschlamm)} = \frac{1000}{ISV} \cdot \sqrt[3]{t_E} \quad [g/L] \quad (8)$$

Die Eindickzeit t_E (in h) im Nachklärbecken wird nach einem Ansatz von Krebs et al. (2000) als Aufenthaltszeit im Schlammbett angesehen:

$$t_E = \frac{\text{Schlammmasse in NK } (M_{S,NK})}{Q_{RS} \cdot TS_{RS}} \quad [h] \quad (9)$$

$$M_{S,NK,neu} = M_{S,NK,alt} + (Q_{zu} \cdot TS_{BB} - Q_{zu} \cdot AFS_e - Q_{RS} \cdot TS_{RS}) \cdot \Delta t \quad [kg] \quad (10)$$

Die Ausgangsschlammmasse ($M_{S,NK,alt}$) im Nachklärbecken kann für den Zeitpunkt $t = 0$ iterativ bestimmt werden. Bei stationären Stoffstromverhältnissen resultiert bei richtiger

Bericht DBU-Projekt Phase 2

Schätzung bereits nach wenigen Zeitschritten: $\text{TS-Gehalt}_{\text{neu}} = \text{TS-Gehalt}_{\text{alt}}$.

Nach Krebs et al. (2000) kann der Schlamm Spiegel je Zeitschritt aus der Schlamm Masse, dem TS-Gehalt im Bodenschlamm und der Oberfläche des Nachklärbeckens wie folgt berechnet werden:

$$\text{Schlamm Spiegel} = M_{\text{S,NK,neu}} / (0,5 \cdot A_{\text{NK}} \cdot \text{TS}_{\text{BS}}) \text{ [m]} \quad (11)$$

Mit diesen dynamischen Bilanzierungsansätzen wurden 2 Mischwasserereignisse nachgebildet, d.h. es wurden anhand der Messwerte Q_{RS} , Q_{AN} , ISV und über den Zeitraum konstanten Werten für AFS_0 und AFS_e theoretische Werte für die TS-Gehalte von Belebung und Nachklärung errechnet.

Bild 4.13 zeigt das Ereignis vom 9.-13. März 2006 und stellt die Messwerte den Ergebnissen der dynamischen Bilanzierung gegenüber. Folgende Ergebnisse lassen sich hinsichtlich des Absetz- und Eindickverhaltens zusammenfassen:

- Zu Beginn des Ereignisses ist ein Absinken des TS-Gehalts im Rücklaufschlamm von 7 auf unter 5,7 g/L feststellbar (s. mittleres Bild). Die Ursache liegt an der proportionalen Erhöhung des Rücklaufschlammstroms. Erhöhte Trübungswerte resultieren daraus nicht, d.h. eine Störung des Absetzprozesses ist in diesem Fall nicht erkennbar.
- Die mit vereinfachten theoretischen Ansätzen ermittelten TS-Gehalte in Belebung und Rücklaufschlamm sowie der Schlamm Spiegel bilden die realen Vorgänge recht gut ab, d.h. die Prozesse in Chemnitz laufen entsprechend der Theorie ab. Der ISV musste jedoch anstatt 145 auf 130 mL/L eingestellt werden, d.h. das Absetzen funktioniert unter diesen Randbedingungen besser als in der Theorie. Die durch die dynamische Bilanzierung nicht ganz erreichte TS-Konzentration im Ereignisverlauf könnte mit einem Ungleichgewicht zwischen Schlammproduktion und –abzug erklärt werden.
- Die gute Prognose des Schlamm Spiegels kann für das Regelkonzept (Kap. 5) eingesetzt werden.
- Die leichten Abweichungen zwischen Berechnung und Messung können nicht mit Störungen am Absetzverhalten erklärt werden. Es könnte sich eventuell um Messungenauigkeiten unter Extremzuständen handeln.

Bericht DBU-Projekt Phase 2

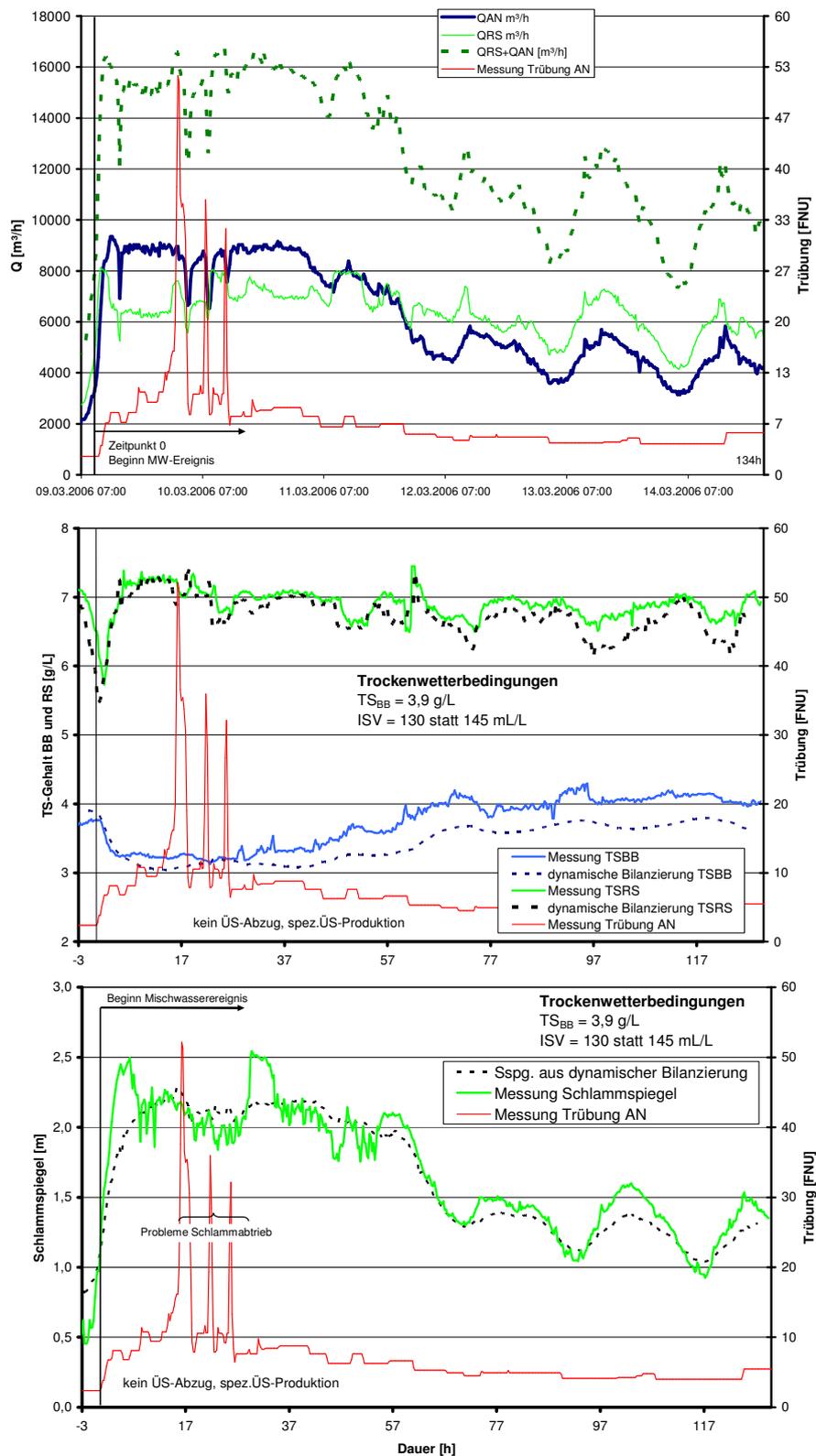


Bild 4.13

Mischwasser-Ereignis 9.-14.3.2006 (ab 12.3. ISV 122)

Bericht DBU-Projekt Phase 2

Auch bei einem anderen Regenereignis vom 16.6.2006, bei dem keine Probleme mit erhöhten Feststoffen im Ablauf auftraten, wurden die Messwerte mit denen aus theoretischen Überlegungen gegenübergestellt. Die Reproduzierbarkeit der Messdaten (TS-Gehalte und Schlamm Spiegel) ist erneut sehr gut.

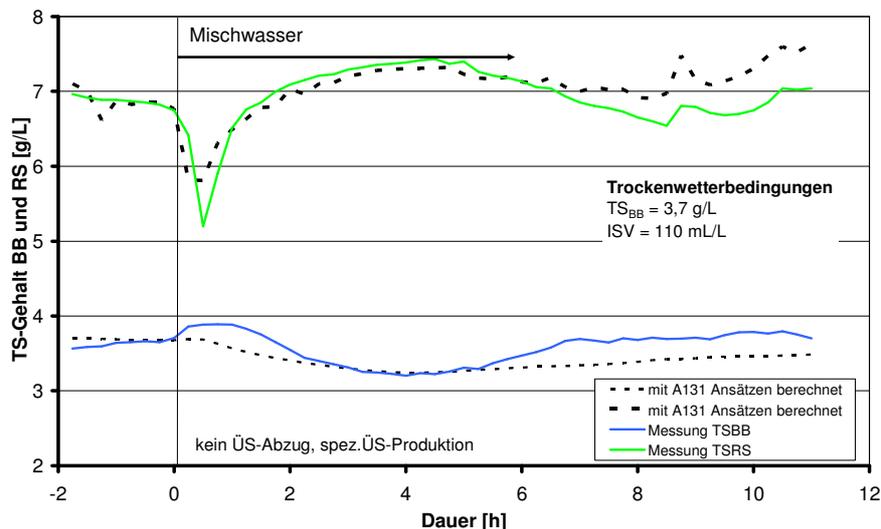


Bild 4.14 Mischwasser-Ereignis 16.6.2006

Ungünstige Rücklaufschlammführung

Der Schlammabzug beeinflusst in vielfältiger Weise die Prozesse im Nachklärbecken (Eindickzeit, Schlamm Spiegel, Dichteströmungen). Die proportional zum Zufluss geregelte Rücklaufschlammführung ist insbesondere zu Beginn von Regenereignissen unvorteilhaft, da die ungünstigen aber unvermeidbaren Zuflussschwankungen zusätzlich verstärkt werden.

Eine einfache Variantenrechnung (Bild 4.15) verdeutlicht, dass ein sehr viel höherer TS-Gehalt im Rücklaufschlamm vorherrscht, wenn die Schlammrückführung anfänglich auf einem niedrigen Niveau gehalten wird (4.800 statt $8.000 \text{ m}^3/\text{h}$). Die transportierten Schlammfrachten sind damit ähnlich zu denen mit hohem Q_{RS} und niedrigem TS-Gehalt. Durch dieses Vorgehen wird weniger Schlamm aus der Belebung in die Nachklärung verfrachtet und der Schlamm Spiegel stellt sich im Beispiel ca. 10 cm niedriger ein. Vorteilhaft ist weiterhin, dass der Eindickvorgang durch die insgesamt niedrigeren Zu- und Abflüsse und durch die geringeren Gradienten weniger gestört wird.

Erst wenn der Q_{RS} auch nach ca. 4 Stunden noch auf dem niedrigen Niveau liegt, ist der Einfluss auf den TS-Gehalt in der Belebung signifikant.

Bericht DBU-Projekt Phase 2

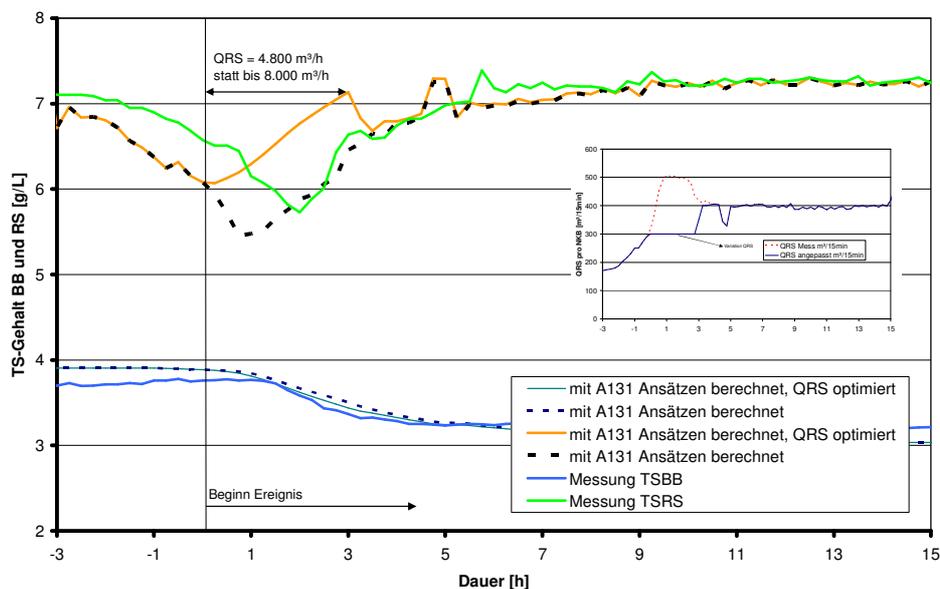


Bild 4.15 Variantenrechnung von Q_{RS} , Ereignis 9./10.3.2006

Hohe Gradienten

Bild 4.13 verdeutlicht, dass die Störungen in einem Bereich auftreten, in dem starke Gradienten im Zufluss sowie im Rücklaufschlamm vorhanden sind. Allerdings muss es parallel einen Zusammenhang zu einem hohen Schlamm Spiegel bzw. einer großen Schlamm Masse in der Nachklärung geben.

Fazit

Abschließend kann zusammengefasst werden, dass die Störungen nur aus einer Überlagerung mehrerer ungünstiger Faktoren resultieren. Im Einzelnen sind insbesondere folgende Randbedingungen bei Mischwasserereignissen ungünstig:

- Schlechte Schlammabsetzeigenschaften (ISV)
- Lange Ereignisse mit einer insgesamt großen Schlamm Masse in der Nachklärung
- Hohe Gradienten von Zufluss und Rücklaufschlamm

Das Regelungskonzept kann diese Probleme mit dem Eingang der Störgrößen ISV, VSV und der Schlamm Spiegelhöhe problemlos identifizieren und eine Höherbeschilderung bzw. gegebenenfalls Gradienten vermeiden.

Bericht DBU-Projekt Phase 2

4.4.4 Statistische Auswertung

Alternativ zu obigen Auswertungen wurden Abhängigkeiten zu verschiedenen potentiell beeinflussenden Parametern für die langen Zeiträume 01.01.2004 – 31.12.2004 (Zeitraum 1) und 01.09.2005 – 31.10.2006 (Zeitraum 2) untersucht (Tab. 4.7).

Tab. 4.7 Untersuchte Größen und Parameter

Untersuchte Größen/Parameter	Abkürzung
Beeinflussende Parameter	
Trockensubstanz im Belebungsbecken	TS _{BB}
Abwassertemperatur im Ablauf der Nachklärung	ATemp
Kläranlagenzufluss	Q _{zu}
Zuflussgradient	Qgrad
Rücklaufschlammvolumenstrom	Q _{RS}
Schlamm Spiegel der einzelnen Nachklärbecken	SSp NKB1-4
Mittelwert des Schlammspiegels in den Nachklärbecken	SSp _{MW}
maximaler Schlamm Spiegel aller Nachklärbecken	SSp _{max}
Flächenbeschickung der Nachklärung	q _a
Schlammvolumenindex	ISV
Schlammvolumenbeschickung	q _{sv}
Beeinflusste Parameter	
P-Gesamt	P _{ges}
Trübung	FNU

Für Überschreitungereignisse lassen sich klare Abhängigkeiten feststellen:

- Der Kläranlagenzufluss ist während mindestens 1,5 h erhöht ($Q_{zu} > 7920 \text{ m}^3/\text{h}$).
- Über den Zeitraum von 1,5 h war der Schlamm Spiegel von mindestens einem Nachklärbecken über 2,2 m. Dabei ist es nicht zwingend notwendig, dass es sich während des Zeitraums durchgängig um ein und dasselbe Becken handelt.
- Die Schlammvolumenbeschickung q_{sv} hat in den letzten 1,5 h mindestens einmal den Wert von $420 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ überschritten.
- Die Konzentration von P_{ges} im aktuellen Zeitschritt ist leicht erhöht ($P_{ges} \geq 0,4 \text{ mg/l}$)
- Die Trübung im aktuellen Zeitschritt ist $> 3 \text{ FNU}$.

Die Gefahr eines Schlammabtriebs ist nur gegeben, wenn alle fünf Bedingungen zeit-

Bericht DBU-Projekt Phase 2

gleich erfüllt sind. Die Ergebnisse bestätigen die vorangegangenen Untersuchungen anhand von Einzelereignissen.

Zur Überprüfung der Bedingungen wurde eine Abfrageroutine entwickelt, welche die Bedingungen in dem Zeitraum anwendet. Es wurden Ereignisse identifiziert, in denen ein Schlammabtrieb zu erwarten wäre. Es wurden alle relevanten Ereignisse richtig identifiziert. Es werden allerdings auch Zeiträume detektiert, in denen gemäß den oben genannten Kriterien keine kritischen Zustände aufgetreten sind, die Werte jedoch trotzdem erhöht waren.

Um bei der Regelung zusätzliche Sicherheiten zu berücksichtigen, wurden die zusammen gültigen 5 Bedingungen als Einzelbedingungen verwendet. Die zeitliche Komponente von 1,5h wurde entfernt, da ein Risiko, dass Probleme bereits am Anfang auftreten, kann nicht vollständig ausgeschlossen werden kann.

4.5 P-Elimination

Wie bereits in Kap. 4.4.2 erläutert, treten bei Mischwasserereignissen vereinzelt Störungen bei der Fällung auf, d.h. die $\text{PO}_4\text{-P}$ -Konzentration nach der Fällung und zeitgleich der P_{ges} im Ablauf der Nachklärung sind erhöht. Eine detaillierte Analyse führte zu folgenden Erkenntnissen:

- Eine Störung der biologischen P-Elimination sollte mit der Fällung kompensierbar sein. (Anmerkung: Die $\text{PO}_4\text{-P}$ -Messdaten im Rücklöse- bzw. im Denitrifikationsbecken sind relativ gering (1-5 mg/L), d.h. die Bio-P ist nicht effektiv).
- Eine Rücklösung in den Nachklärbecken kann aufgrund der hohen Konzentration bereits im Zulauf der Nachklärung als Ursache ausgeschlossen werden.
- Die Fällmitteldosierung erfolgte bislang nicht frachtbasiert sondern auf die Konzentration im Zulauf der Nachklärung (Messtelle MC4). Hierdurch resultierte eine zu späte und anfängliche zu zaghafte Dosierung des Fällmittels (Bild 4.16)

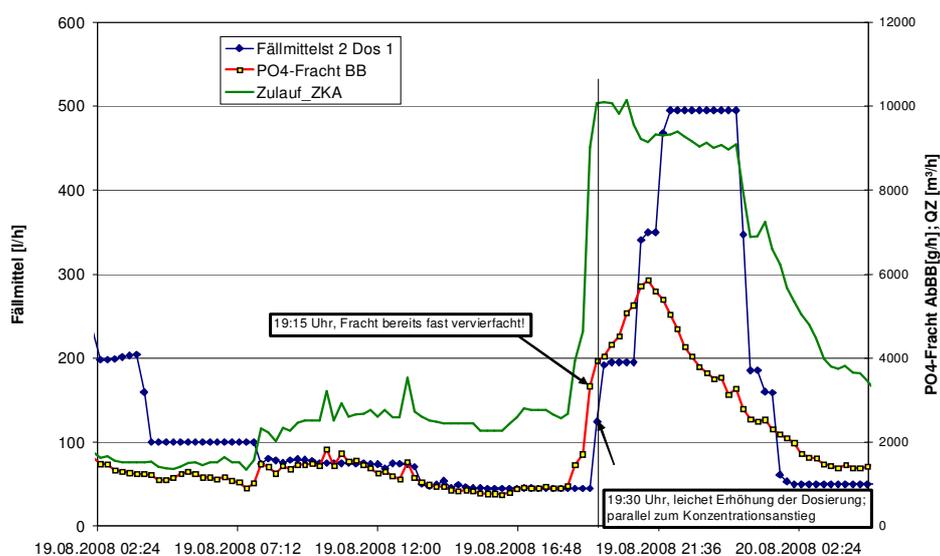


Bild 4.16 P-Fällung bei einem Mischwasserereignis

Nach Klärung der Ursachen während der großtechnischen Untersuchungsphase und einer Diskussion mit dem Betreiber der KA Chemnitz wird die dort vorhandene Regelung auf eine frachtbasierte umgestellt, so dass zukünftig keine Probleme mehr erwartet werden. Parallel wurde vorgeschlagen, die Reaktionszeit des $\text{PO}_4\text{-P}$ -Messgerätes sowie die ausreichende Probenstromzuführung zu prüfen. Verzögerungen in diesen Bereichen können zu verspäteten und verfälschten Messwerten führen, die auch der beste Regler nicht kompensieren kann.

Bericht DBU-Projekt Phase 2

4.6 Fazit

Bautechnische Limitierung

Bautechnisch ist die Anlage beim gegenwärtigen Betrieb von 5 Belebungsbecken bis maximal 11.340 m³/h belastbar. Maschinentechnisch ist der Kläranlagenzufluss durch das Zwischenpumpwerk zur Vorklärung auf ca. 11.000 m³/h limitiert. Die Belüftungs-kapazität sowie die Rezirkulationsströme sind in diesem Bereich nicht limitierend.

Damit sollte eine Mehrbeschickung bis auf 11.000 m³/h problemlos möglich sein.

Reaktion KA auf MW

Die Auswertung der Messdaten der Jahre 2004 bis 2006 ergab folgende Reaktionen der einzelnen Reinigungsprozesse bei Mischwasserbelastungen:

- Die **Nitrifikation** stellt keinen kritischen Prozess dar. Die NH₄-N-Konzentration im Ablauf der Nachklärung hat den Grenzwert von 5mg/L auch im Winter nicht überschritten. Es sind ausreichende Kapazitäten vorhanden. Notfalls könnte der NH₄-N-Messwert im Ablauf der Belebung bereits mit einem Prognosehorizont von mindestens 45 min auf Probleme hinweisen.
- Die **Denitrifikationsleistung** ist vereinzelt unter Trockenwetterbedingungen zu niedrig. Eine genaue Ursachenanalyse war im Rahmen des DBU-Projektes nicht möglich; grundsätzlich scheint ein Substratmangel ursächlich zu sein. Bei Mischwasser ist im Verlauf des Ereignisses eine Verdünnung feststellbar. Bevor diese einsetzt kann jedoch die Überlagerung mit noch hohen Nitratgehalten (teilweise bis 14 mg/L) und einem NH₄-N-Gehalt um 3-4 mg/L zu einer Überschreitung des zulässigen Grenzwertes von 16,5 mg/L führen. Bei 4 Ereignissen traten Konzentrationen von 14-16 mg/L auf.
- Die **Abtrennleistung der Nachklärung** war bei einigen Ereignissen gestört. Dies zeigte sich an zeitgleich erhöhten Trübungs- und P_{ges}-Konzentrationen. Der CSB-Grenzwert (60 mg/L) wurde stets eingehalten. Hohe Schlammindizes und hohe Schlamm Spiegel sind eindeutige Zeichen und ideale Störgrößen für diesen Prozess.
- Die **Phosphorelimination** ist im untersuchten Zeitraum häufiger problematisch gewesen. Der P_{ges} Grenzwert (1 mg/L) wurde auch ohne Störungen der Absetzleistung erreicht bzw. überschritten, da die Fällung bislang nicht frachtbasiert geregelt war und somit meist zu träge auf die erhöhten Frachten reagierte.

Grundsätzlich wird empfohlen, die Störungen der Denitrifikation und des Absetzverhaltens detailliert zu untersuchen.

5 Entwurf des fuzzybasierten Regelungskonzeptes

5.1 Grundlagen der Fuzzy-Regelung

Das Regelungskonzept wird in der Fuzzy-Logik basierten Software CONTROL (itwh) erstellt. Der darin enthaltene Regelinterpreter (Bild 5.1) verarbeitet Informationen über die Systemzustände aus Messdaten auf der Grundlage einer vorgegebenen Regelbasis. Als Ergebnis der Verarbeitung liefert er neue Sollwerte für definierte Regelorgane, in diesem Anwendungsfall für den Zufluss zur Kläranlage.

In der **Fuzzy-Logik** (engl.: fuzzy = unscharf) können verbal formuliertes Wissen und Zusammenhänge genauso für das Ziehen von Schlussfolgerungen oder die Analyse und Steuerung komplexer Vorgänge verwendet werden wie konkrete Messgrößen. Die für eine Steuerung notwendigen Regeln werden als einfache, umgangssprachlich formulierte WENN...DANN...- Beziehungen aufgestellt (z.B. „Wenn Ablaufgrenzwert $\text{NH}_4\text{-N}$ ‚hoch‘, dann maximaler Mischwasserzufluss ‚niedrig‘“).

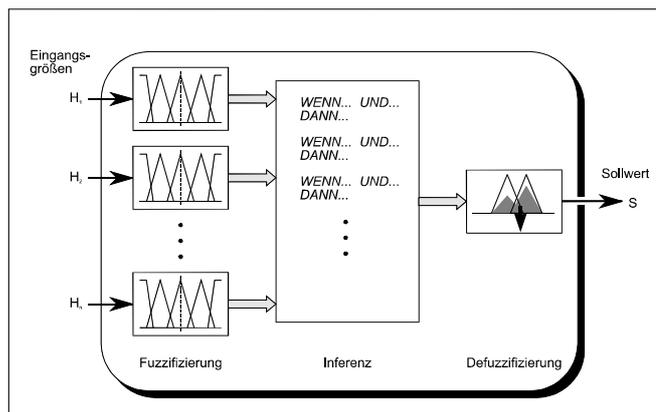


Bild 5.1 Vereinfachte Darstellung der Arbeitsweise des Regelinterpreters

Die Überführung scharfer Eingangsgrößen in unscharfe Zugehörigkeitsgrade von Fuzzy-Mengen wird "**Fuzzifizierung**" genannt. Bei den Begriffen "hoch" oder "niedrig" handelt es sich um verbale, unscharfe Informationen, die als Eingangsdaten für eine Berechnung näher definiert werden müssen. Dazu wird eine Mengenzugehörigkeit, die auf dem klassischen Zweiwertigkeitsprinzip (z.B. „zu“ oder „auf“) beruht, so aufgeweicht, dass sich Zwischenwerte (von „zu bis auf“) ergeben. Die klassische Mengenlehre eignet sich nicht zur Modellierung dieses Zwischenbereiches, so dass eine "unscharfe Menge", ein sogenanntes "Fuzzy-Set" hinzugezogen wird. Die analytische Beschreibung eines Fuzzy-Sets wird durch Kennlinien visualisiert, die eindeutig durch 3 (dreiecksförmig) oder 4 (trapezförmig) Wertepaare in einem kartesischen Koordinatensystem beschrieben werden. Die zugehörigen Y-Werte müssen auf $y_1=0, y_2=1, y_3=1, y_4=0$ gesetzt werden. Zur Charakterisierung einer Kenngröße (= linguistische Variable, z.B.

Bericht DBU-Projekt Phase 2

CSB Ablauf Nachklärung) werden meist mehrere Fuzzy-Sets (niedrig, mittel und hoch) als "linguistische Terme" benötigt und für jeden wird eine Zugehörigkeit ermittelt. Diese wird mittels Fuzzy-Inferenz und Defuzzifizierung weiterverarbeitet.

Bild 5.2 (links) zeigt exemplarisch die Zugehörigkeitsfunktionen am Beispiel des Mess-elements CSB im Ablauf der Kläranlage. (Beispiel: der Messwert von 48,7 mg/L gehört 25% zu „niedrig“ und 75% zu „mittel“ und 0% zu „hoch“.)

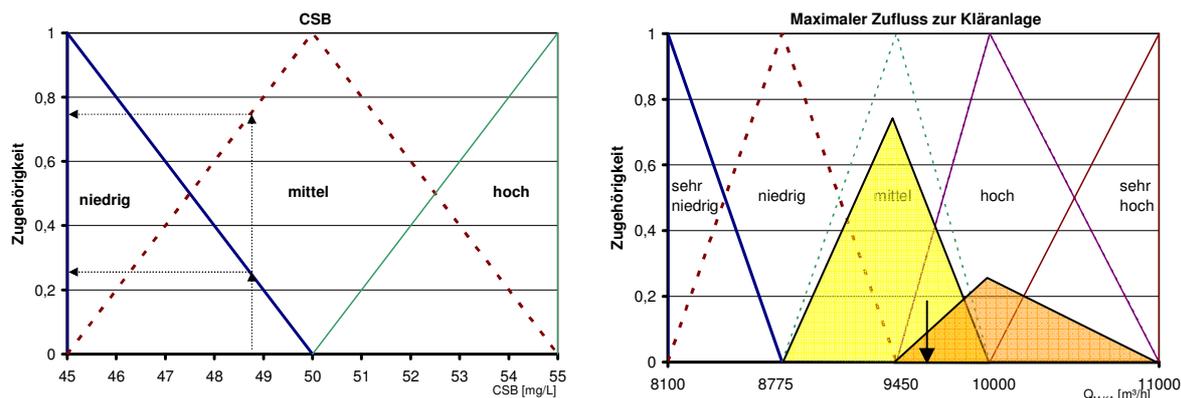


Bild 5.2 links: Fuzzy-Sets für die linguistische Variable CSB_{AN}
rechts: Zugehörigkeitsfunktion für das Regelement $Q_{M,KA}$

Die **Fuzzy-Inferenz** ist eine Verarbeitungsvorschrift, die das Regelwerk auswertet. Eine oder mehrere fuzzifizierte Eingangsgrößen werden auf eine unscharfe Ausgangsmenge übertragen. Die Zusammenhänge zwischen Ein- und Ausgangsgrößen werden in Form von WENN... DANN... Regeln formuliert, die beliebig mit Bedingungen erweitert werden können (UND, ODER). Mehrere einzelne Regeln bilden zusammenhängend die Regelbasis. Da diese Regeln auf unscharfen Informationen aufbauen, muss für den **Verknüpfungsoperator** ein spezieller Algorithmus angesetzt werden (im Projekt: Fuzzy-UND-Verknüpfung, Min-Operator).

Neben den Verknüpfungsoperatoren sind zur Formulierung von Regeln noch **Vergleichsoperatoren** (*gleich* (=), *ungleich* (\neq), *kleiner* (<), *größer* (>), *kleiner gleich* (\leq)) notwendig, die linguistische Variablen mit linguistischen Termen vergleichen und eine konkrete Zuordnung ermöglichen. Die gestrichelte Linie in Bild 5.2 (links) zeigt z.B. den Zugehörigkeitsgrad des Operators „gleich“ (= mittel). Einfache WENN...DANN...Regeln im angegebenen Beispiel sind z.B.:

WENN	CSB „niedrig“	DANN	$Q_{M,KA}$ „hoch“	(Gewicht 25%)
WENN	CSB „mittel“	DANN	$Q_{M,KA}$ „mittel“	(Gewicht 75%)

Im Anschluss wird defuzzifiziert, d.h. es wird wiederum ein scharfer Ausgangswert ermittelt. Als Ergebnis der **Defuzzifizierung** resultiert mit Hilfe der modifizierten Schwerpunktmethod aus der Gewichtung der beiden Regeln aufgrund des Zugehörigkeitsgrades der scharfe Sollwert des Zuflusses mit 9587 m³/h (Bild 5.2, rechts).

Bericht DBU-Projekt Phase 2

5.2 Potentielle Störgrößen für die Regelung des Zuflusses zur Kläranlage

5.2.1 Übersicht und Erläuterung der Störgrößen

Übliche Messwerte auf Kläranlagen wurden im Hinblick auf die Nutzungsmöglichkeit als Störgröße im Regelungskonzept überprüft. Wichtiges Kriterium war in dieser Analyse das Potential der Messdaten auf Auffälligkeiten im Reinigungsprozess, auf eine bevorstehende Überschreitung von Grenzwerten oder sonstige wiederkehrende Probleme im Zusammenhang mit Mischwasserereignissen hinzuweisen.

Tab. 5.1 Übersicht über potentielle Störgrößen mit und ohne Prognosehorizont

	Messwerte	Kontroll-Ziel	Kommentar
Einfache Störgrößen			
Gesetzliche Grenzwerte, Ablauf NKB	NH ₄ -N, NO ₃ -N (= N _{ges,anorg}) P _{ges,AN} CSB _{AN}	Nitrifik., Denitrifikation P-Elimin., Absetzleistung Absetzleistung	Grundlegende Randbedingung
Sonstige	Trübung Ablauf NK	Absetzleistung	
Anstieg ΔQ_z pro Zeitschritt	Q _Z	Absetzleistung	
Störgrößen mit Prognosehorizont			
Betriebswerte	TS _{BB} je Straße	Biol. Umsatz, Absetzen	Übliche Bandbreiten ok? Wenn nicht: Hinweis auf Problem
	TS _{RS}	Absetzleistung, Eindicken	
	O ₂	Nitrifikation	
Via Nitrikapazität	f (NH ₄ -N _Z , Q _Z , TS _{BB,Labor} , T _{BB} , .)	Nitrifikation	Einfaches Modell
Via DN-Kapazität	f (CSB _Z , Q _Z , NO ₃ -N _{DN} , Q _{Rezi})	Denitrifikation	Einfaches Modell
Zulässige q _{sv}	f (ISV, A _{NK} , max.Q _{ZU} , TS _{BB})	Absetzleistung	Einfaches Modell
Sonstige	NH ₄ -N Abl. Belebungsbecken	Nitrifikation	Können Hinweise liefern, dass Probleme bevorstehen
	NO ₃ -N Abl. Belebungsbecken	Denitrifikation	
	PO ₄ -P Abl. Belebungsbecken	P-Elimination	
	VSV (Online, Labor) ISV	Absetzleistung	
	Schlamm Spiegelhöhe NKB	Absetzleistung	
	Prognose Schlamm Spiegel	Absetzleistung	
	NH ₄ -N-Fracht im Zulauf BB	Nitrifikation	
	CSB/NH ₄ -N-Verhältnis	Denitrifikation	
NO ₃ -N, PO ₄ -P Ablauf DN	Bio-P, Denitrifikation		
Abflussmodell	Regenmesser	Dauer & Intensität => Prognose der Belastung	Modell

Ideale Störgrößen haben einen Prognosehorizont vom Auftreten der Auffälligkeit bis zum erhöhten Wert im Ablauf der Kläranlage, da nur so eine gewisse Zeit mit Handlungsspielraum zur Reduzierung des Zuflusses zur Verfügung steht. Sind die Ablaufwerte erst einmal kritisch, wirkt eine Zuflussdrosselung zu spät!

Bericht DBU-Projekt Phase 2

In Tab. 5.1 sind verfügbare Messwerte als mögliche Störgrößen (15-min Messwerte, unter Umständen reichen auch Laborwerte) und ihr potentielles Kontrollziel zusammengestellt. Es wird unterschieden nach Störgrößen mit und ohne Prognosehorizont.

Die „einfachen Störgrößen“, d.h. die Messwerte im Ablauf der Kläranlage, sollten in jedem Fall in das Regelungskonzept integriert werden, um bei kritischen Zuständen den Zufluss eher zu reduzieren. Nachfolgend werden die potentiellen „Störgrößen mit Prognosehorizont“ bezüglich ihres möglichen Nutzens bzw. des Problems, das sie beschreiben können, kurz erläutert und durch die Erkenntnisse aus den Untersuchungen in Chemnitz (s. auch Kap. 5.3) ergänzt. Die Störgrößen sind dem jeweiligen Prozess zugeordnet, dem sie als Kontrollziel dienen. Die dazugehörigen Bereichsgrenzen werden in Kap. 5.2.4 diskutiert.

Nitrifikation

- **O₂-Gehalt im Belebungsbecken:** wichtige Betriebsgröße; niedrige Werte unter 1,0 mg/L können zum Erliegen der Nitrifikation führen.
- **TS-Gehalt im Belebungsbecken:** niedrige Werte (z.B. unter 2,5 mg/L, abhängig von Belastung und Kapazität) können zu einem geringen Schlammalter und damit zum Erliegen der Nitrifikation führen.
- Ermittlung der **Nitrifikationskapazität** und damit Vorhersage des voraussichtlichen NH₄-N-Gehalts im Ablauf: vgl. Kap. 5.2.2. Die Prognosezeit ist gut, die Prognosegüte weniger, d.h. die Abweichung der Vorhersage vom real eintretenden Zustand ist zum Teil leider relativ hoch!
- **NH₄-N-Konzentration im Ablauf der Belebung:** Bietet die Möglichkeit der Vorhersage des Ablaufwertes durch die Aufenthaltszeit und den Ausgleichseffekt (Abflachung von peaks) der Nachklärung. Da der weitere Ereignisverlauf und damit die Strömungsbedingungen unklar sind, kann keine exakte rechnerische Vorhersage erfolgen. Eine für die KA Chemnitz durchgeführte „worst case“-Betrachtung zeigte (vgl. Kap. 4.3.1), dass die Konzentrationsspitze im Ablauf Belebung bis zum Ablauf Nachklärung um mindestens 28% reduziert wird. Der Zeitvorsprung beträgt mindestens 45 Minuten.
- Die **NH₄-N-Fracht im Zulauf zur Belebung** kann ebenfalls bereits prognostische Hinweise geben, ob die Nitrifikation überlastet wird. Da in Chemnitz die Nitrifikation ausreichende Kapazitäten aufwies, wurde diese Störgröße nicht weiter untersucht.

Denitrifikation

- **NO₃-N-Konzentration im Ablauf des Belebungsbeckens:** bringt keine entscheidende Vorhersage, da bei Regen aufgrund der einsetzenden Verdünnung kein weiterer Anstieg zu erwarten ist. Prognostisch ist in diesem Fall eher der Messwert NO₃-N im Ablauf der Nachklärung hilfreich, da dieser im Vorfeld hohe Trockenwetterkonzentrationen identifiziert, die für eine Überschreitung des gesetzlichen Grenzwertes N_{ges} in Kombination mit NH₄-N-peaks im Ablauf ursächlich sind.
- **Denitrifikationskapazität:** eher nicht erforderlich, da grundsätzlich eine Verdünnung des NO₃-N bei Mischwasser auftritt (vgl. Kap. 5.2.2).
- **Verhältnis CSB/NH₄-N:** Bei ungünstigen Verhältnissen kann eine unzureichende Denitrifikation auftreten. Aufgrund der in Chemnitz bereits bei Trockenwetter am Messwert NO₃-N_{AN} identifizierten Probleme wurde diese Störgröße nicht näher untersucht.

Absetzvorgang im Nachklärbecken

Für die Kontrolle des Absetzvorgangs gibt es verschiedene, nachfolgend aufgeführte Messwerte. Teilweise geben sie ähnliche bzw. voneinander abhängige Auffälligkeiten wieder und haben redundanten Charakter:

- Das **Schlammvolumen VSV** ist der wichtigste unmittelbare Messwert, der die Schlammabsetzfähigkeit charakterisiert. Die Festlegung der Bereichsgrenzen (vgl. hierzu Kap. 5.2.4) wurde in Chemnitz analog zu den Erkenntnissen aus der Auswertung mehrjähriger Datenreihen vorgenommen. Aufgrund des Zusammenhangs mit der Schlammvolumenbeschickung ($q_{sv} = VSV \cdot q_A$) kommt diesem Wert eine besondere Bedeutung zu, da die Oberflächenbeschickung $q_{A,max}$ bereits die Stellgröße beinhaltet ($= Q_{Z,max}/A_{NK}$ [m/h]). Die Erfahrungen mit dem Online-Messgerät zeigen z.T. im Tagesverlauf stark schwankende Werte. Da die Veränderung der Schlamm-eigenschaften träge ist, erscheint die Einbeziehung des täglichen Labormesswertes in die Regelung als sinnvoll.
- **Schlammvolumenbeschickung q_{sv} :** Dieser Parameter ist die wesentliche Grundlage zur Bemessung der erforderlichen Nachklärbecken-Oberfläche ($q_{sv} \leq 500$ l/(m²·h)). Wie oben erläutert wird im zu konzipierenden Regelkonzept aufgrund des linearen Zusammenhangs zwischen der Stellgröße $Q_{Z,max}$ und der Oberflächenbeschickung ($q_A = Q_{Z,max} / A_{NK}$) die aus den Messdaten ermittelte zulässige Schlammvolumenbeschickung für die Ermittlung der Fuzzysets des VSV sowie der Regeln herangezogen. Als Störgröße wird sie somit nur indirekt verwendet.

Bericht DBU-Projekt Phase 2

- **TS-Gehalt im Belebungsbecken:** Sehr hohe TS-Gehalte (z.B. > 4,5 g/L) führen zu einer hohen Belastung der Nachklärung und behindern das Absetzen. Die Einbeziehung dieses Messwertes als Störgröße kann ungewöhnliche Betriebszustände identifizieren (z.B. hoher TS-Gehalt da Schlammabzug außer Betrieb). Seine Nutzung als Störgröße sollte zusätzlich, d.h. parallel zum VSV, der hohe TS-Gehalte bereits ebenfalls indirekt erfasst, erfolgen und die Zuflusserhöhung gegebenenfalls verhindern. Parallel geht der Messwert in die Berechnung des ISV ein.
- **Schlammindex ISV:** Dieser Rechenwert ($= \text{VSV} / \text{TS}_{\text{BB}}$) charakterisiert die Absetz- und Eindickfähigkeit des Schlammes bzw. stellt eine Vergleichbarkeit des Wertes VSV durch die Berücksichtigung des vorherrschenden TS-Gehaltes dar. Unter ungünstigen Voraussetzungen, z.B. bei Dominanz fadenförmiger Bakterien (Blähschlamm bei $\text{ISV} \geq 150 \text{ mL/g}$) ist ein Versagen der Nachklärung bei erhöhten Zuflüssen zu erwarten. Eine Mehrbeschickung kann unter Einbeziehung dieser prognostischen Störgröße und der Definition der Fuzzy-Sets basierend auf einer Messdatenauswertung frühzeitig unterbunden werden.
- **Schlammspiegelhöhe:** Während die Schlammabsetzeigenschaft im Regelungskonzept bei ungünstigen Randbedingungen die Höherbeschickung bereits zu Beginn des Ereignisses verhindert, ist die Messung der Schlammspiegelhöhe im Regelungskonzept eine Störgröße, die während des Ereignisses bevorstehende Probleme mit Suspensaabtrieb prognostizieren kann, bevor diese tatsächlich auftreten. Ein sehr hoher Schlammspiegel kann entweder auf ein gestörtes Absetzverhalten oder auf eine Störung bei der Rücklaufschlammförderung hinweisen. Da auch nur eins von mehreren Becken diese Probleme haben könnte, sollte neben dem Mittelwert auch die Messung in den einzelnen Becken als Störgröße eingehen.
- Der einfache **theoretische Ansatz zur Ermittlung der Schlammspiegelhöhe**, der in Kap. 4.4.3 vorgestellt wurde, kann neben der Messung einen zusätzlichen Prognosezeitgewinn bringen. Mit den Eingangsgrößen:
 - TS-Gehalte in Belebung (als $\text{TS}_{\text{BB,alt}}$) und Rücklaufschlamm (TS_{RS}) im aktuellen Zeitschritt
 - ISV im aktuellen Zeitschritt bzw. als Tageswert
 - Schlammspiegelhöhe im aktuellen Zeitschritt
 - Festen bzw. Standardwerten für AFS_{ZB} bzw. AFS_{AN}
 - $\text{TS}_{\text{BS}} = \text{TS}_{\text{RS}} / 0,7$
 - Zufluss $Q_{\text{Z,Max}}$ (für Chemnitz maximal zulässig z.B. 11.000 m³/h) und Rücklauf-

Bericht DBU-Projekt Phase 2

schlamm $Q_{RS} = 0,7 \cdot Q_{ZMax}$

- Annahme, dass die Dauer der Mischwasserbelastung 3 Stunden beträgt, errechnet sich aus den Gleichungen (7) bis (10) die neue Schlammmasse $M_{S,NK,neu}$ im Nachklärbecken. Der zu erwartende, maximale Schlamm Spiegel bei den vorhandenen Randbedingungen stellt sich nach Gleichung (11) ein. Dieser Rechenwert kann die gleichen Bereiche erhalten wie der Messwert. Diese Berechnung wurde im Regelkonzept für Chemnitz zunächst nicht umgesetzt.
- Der **TS-Gehalt im Rücklaufschlamm** ist eine Messgröße, die Hinweise auf Störungen des Absetzverhaltens geben kann. Ein sehr geringer TS-Gehalt kann auf hydraulische Überlastungen hinweisen; ein sehr hoher auf eine eventuell gestörte Schlammrückführung in die Belebung, die eine sehr hohe Schlammmasse im Nachklärbecken mit der potentiellen Gefahr des Schlammabtriebs zur Folge haben kann. In Chemnitz wurde diese Messung zunächst nicht als Störgröße implementiert.

P-Elimination

Neben dem Ablaufmesswert $P_{ges,AN}$ kann nur die PO_4 -P-Konzentration im Zulauf zur Nachklärung unmittelbar nach der Fällung Hinweise mit einem gewissen Prognosehorizont geben. Der Vorhersagezeitraum ist jedoch nicht groß, so dass idealer Weise eine frachtproportionale Fällung Probleme bereits im Ansatz verhindert bzw. die obere Bereichsgrenze entsprechend niedrig gewählt wird (vgl. Kap. 5.2.4).

5.2.2 Störgrößen durch Prognose der Stickstoffablaufwerte

Ausgangssituation und Zielstellung

Um gegenüber reinen Messwerten einen zusätzlichen Prognosevorsprung zu erreichen wurde bereits in Projektphase 1 ein Modellansatz zur deterministischen Prognose der Nitrifikationskapazität hergeleitet. Die zugrunde liegenden Berechnungsansätze sind im Abschlussbericht der 1. Projektphase (itwh, ISI, 2005) ausführlich dargestellt.

Inhalt der Arbeiten in Projektphase 2 war die Erweiterung des Ansatzes auf die Denitrifikation und die programmtechnische Umsetzung des Ansatzes zur direkten Zuflusssteuerung.

Bericht DBU-Projekt Phase 2

Veränderung am Nitrifikationsansatz

Gegenüber dem Ansatz in Projektphase 1 wurden nur geringfügige Änderungen vorgenommen. Um den Einfluss ggf. limitierender Sauerstoffkonzentration zu berücksichtigen wurde zusätzlich die mittlere O_2 -Konzentration im belüfteten Beckenabschnitt über eine Monod-Funktion berücksichtigt. Der Stickstoffeinbau in die Biomasse wurde vereinfachend nur noch auf den abbaubaren Anteil des Zulauf-CSB bezogen. Damit kann auf den Messwert des CSB im Ablauf verzichtet werden.

Stickstoffeinbau in die Biomasse $B_{N,BM,i}$

$$B_{N,BM,i} = 0,025 \cdot CSB_{VK,i} \cdot (1 - aSi) \cdot Q_{zu,i} \quad (12)$$

Regelung nach der Denitrifikationskapazität

Die Regelung nach der Denitrifikationskapazität basiert ebenfalls auf einer dynamischen Massenbilanz über das Belebungsbecken gemäß Gleichung (6) (Kap.4.2.3)

Diese Gleichung wurde analog zum Vorgehen bei der Berechnung der Nitrifikationskapazität zu einer Differenzgleichung vereinfacht, wobei die Zeitschritte durch die zeitliche Auflösung der Messgeräte von 15 min. definiert sind. Vereinfachend wird darüber hinaus eine vollständige Nitrifikation angenommen, d.h. die in der Nitrifikationszone gebildete Nitratmenge pro Zeitschritt ergibt sich aus der Differenz von Zulauf-Nitrat und Einbau in die Biomasse. Die Nitratkonzentration im Ablauf der Belebungszone kann damit nach Gleichung (13) prognostiziert werden.

$$NO_3N_{BB,i} = \frac{[B_{N,i} - B_{N,BM,i} + \max(0; Q_{RC,i-1} \cdot NO_3N_{BB,i-1} + Q_{RS,i-1} \cdot NO_3N_{NK,i-1} - B_{DN,i}) + V_N/\Delta t \cdot NO_3N_{BB,i-1}]}{Q_{zu,BB,i} \cdot V_{Ni}/\Delta t} \quad (13)$$

mit TKN-Fracht im Ablauf Vorklärung $B_{N,zu,i}$:

$$B_{N,zu,i} = NH_4 - N_{VK,i} \cdot Q_{zu,i} \cdot 1,3 \quad (14)$$

Denitrifizierbare Stickstofffracht $B_{DN,i}$:

$$B_{DN,i} = \frac{y_H - 1}{2,86} \cdot \frac{V_{DN}}{V_{ges}} \cdot (1 - aSi) \cdot CSB_{VK,i} \cdot Q_{zu,i} \quad (15)$$

Gesamtdurchfluss durch das Belebungsbecken $Q_{zu,BB,i}$:

$$Q_{zu,BB,i} = Q_{zu,i} + Q_{RS,i} + Q_{RC,i} \quad (16)$$

Die Prognosezeit ergibt sich aus dem Messzeitpunkt zuzüglich der Fließzeit durch die Belebungszone. Diese ergibt sich mit der vorhandenen Beckenkaskadierung überschlägig

Bericht DBU-Projekt Phase 2

aus Gleichung (17).

$$t_{\text{prog},i} = t_i + 8/9 \cdot V_{\text{BB}} / Q_{\text{zu,BB}} \quad (17)$$

Ergebnisse der Prognose

Der entworfene Ansatz wurde für den Messzeitraum 2006 validiert. Bild 5.3 und Bild 5.4 zeigen beispielhaft die Prognosen für Ammonium und Nitrat. Da im Messzeitraum der Parameter Ammonium nur selten 1 mg/L überschritt, ist eine Bewertung anhand der schwachen Peaks schwer möglich. Insgesamt wird durch die Prognose die Nitrifikationskapazität eher unterschätzt. Die Nitratwerte werden hingegen sehr gut vorhergesagt. Der Prognosevorsprung zum Messwert Ablauf Belebung beträgt bei maximalem KA-Zufluss ca. 3 Stunden.

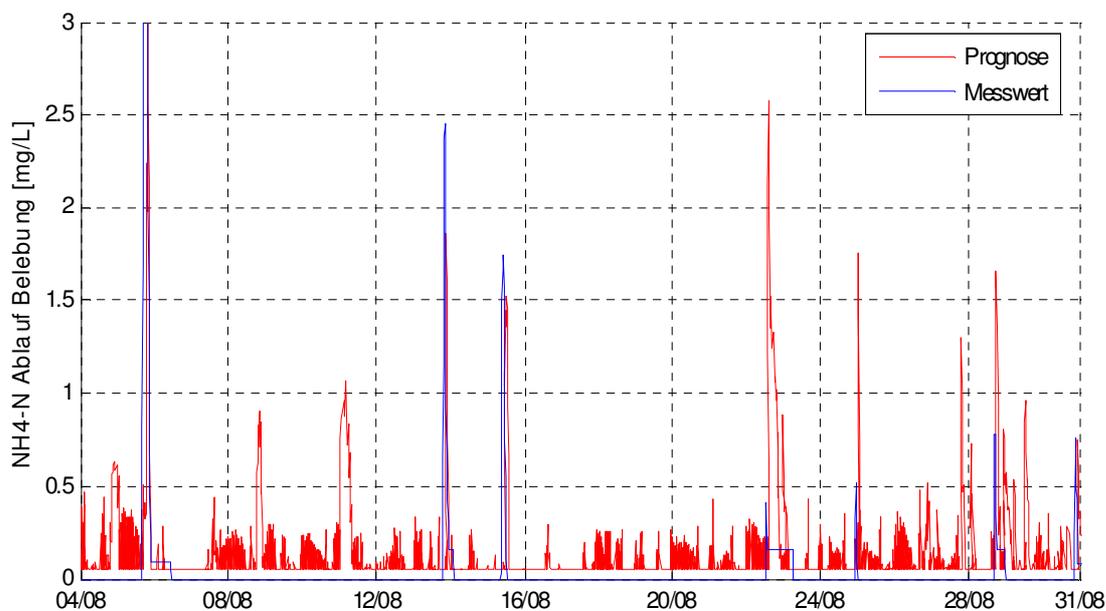


Bild 5.3 Prognostizierte und gemessene $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration, Ablauf BB

Bericht DBU-Projekt Phase 2

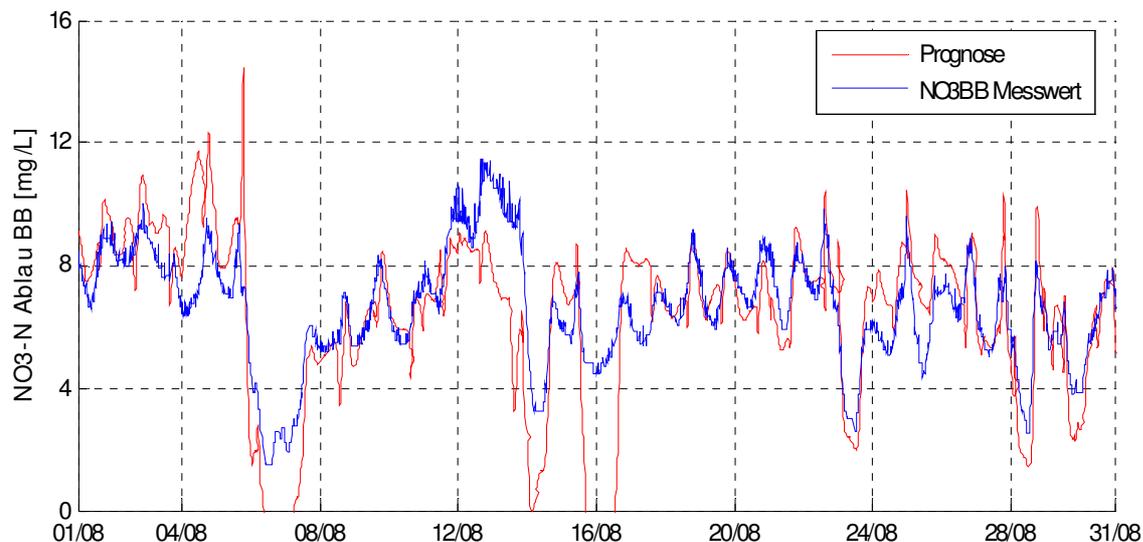


Bild 5.4 Prognostizierte und gemessene $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konz., Ablauf Belebung

Zuflusssteuerung mit Prognoseansatz

Um die Wirkung des Ansatzes auf die Zuflussregelung und die resultierende Ammonium-Ablaufkonzentrationen zu prüfen, wurde der Ansatz als Matlab-Routine zur Zuflusssteuerung umgesetzt. Dies erfordert die Umstellung der Massenbilanzen für Ammonium und Nitrat nach KA-Zufluss. Die Konzentration zum Zeitpunkt i wird dabei auf den Sollwert gesetzt (Gleichung (18) (19)). Der jeweils niedrigere Zufluss ist maßgebend.

$$Q_{\text{zu},\text{N},i} = \frac{rN_{\text{pot},i} + B_{\text{N,BM},i} + V_{\text{BB}} \cdot (\text{NH}_4\text{N}_{\text{soll}} - \text{NH}_4\text{N}_{\text{BB},i-1}) / \Delta t}{\text{TKN}_{\text{BBZu},i} - \text{NH}_4\text{N}_{\text{soll}}} \quad (18)$$

$$Q_{\text{zu},\text{DN},i} = \frac{rN_{\text{pot},i} + B_{\text{N,BM},i} + V_{\text{BB}} \cdot (\text{N}_{\text{ges,soll}} - \text{NO}_3\text{N}_{\text{BB},i-1} - \text{NH}_4\text{N}_{\text{BB},i-1}) / \Delta t}{\text{TKN}_{\text{VK},i} + \text{NH}_4\text{N}_{\text{BB},i-1} \cdot \text{RC} + \text{NH}_4\text{N}_{\text{NK},i-1} \cdot \text{RS} - \text{N}_{\text{ges,soll}} \cdot (1 + \text{RC} + \text{RS})} \quad (19)$$

Das Regelungskonzept wurde über einen Simulationszeitraum von 100 Tagen (7.06 – 15.09. 2006) am kalibrierten KA-Modell getestet. Hierzu wurde auch die Zuflussregelung der Kläranlage (siehe Abschnitt 2.3.1) vereinfacht als Regelkreis abgebildet (Bild 5.5). Der Schieber wurde dabei hydraulisch als Ausfluss mit unten liegender Öffnung beschrieben ($\mu=0.6$). Die im Regler verwendete Stellgeschwindigkeit des Schiebers wurde vom Anlagenpersonal bestimmt.

Bericht DBU-Projekt Phase 2

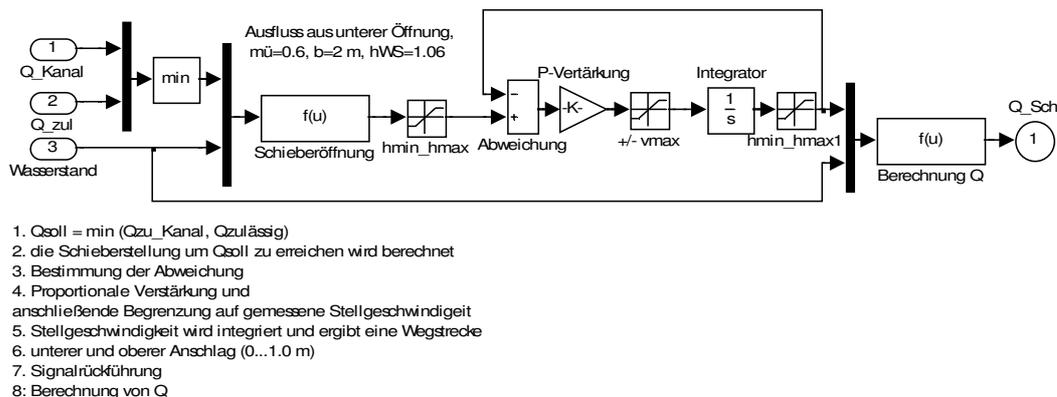


Bild 5.5 Schiebersteuerung

Die Wirkung der prognostischen Zuflussregelung auf die Konzentration im Ablauf Nachklärung ist in Bild 5.6 dargestellt. Um einen Regelungseingriff zu erzwingen, wurde die Soll-Konzentration im Ablauf Nachklärung bewusst sehr niedrig mit 1 mg/L bzw. 3 mg/L eingestellt. Als Referenz ist die simulierte NH_4 -N-Konzentration ohne Regelungseingriff dargestellt.

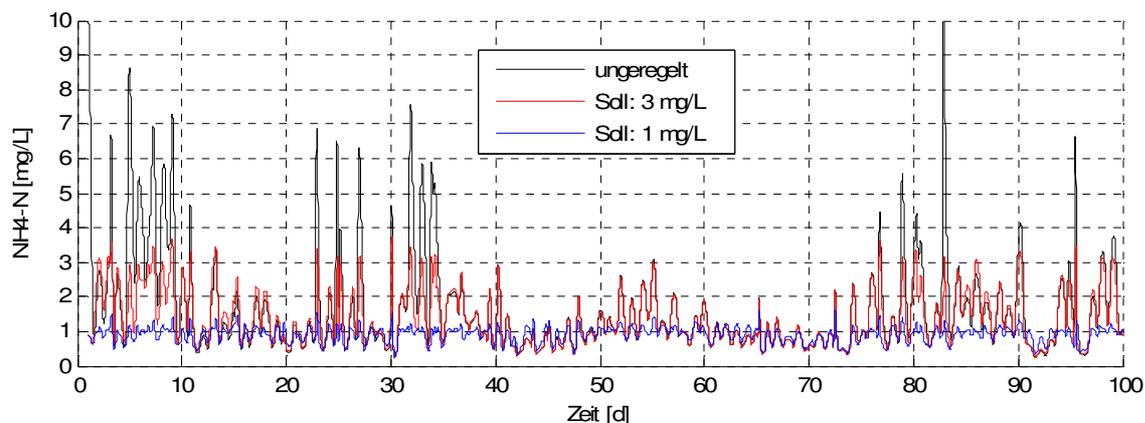


Bild 5.6 Wirkung der prognostischen Zuflussregelung auf die Ammoniumablaufkonzentration

Die Regelung ermöglicht eine relativ sichere Einhaltung der vorgegebenen Sollwerte. Allerdings treten auch Überschreitungen von bis zu 0,8 mg/L auf. Diese sind einerseits auf das P-Verhalten und die Trägheit des Zuflussreglers zurückzuführen. Eine wesentliche Ursache ist jedoch im Regelungskonzept selbst zu suchen. Entgegen der getroffenen Annahme ist die Kläranlage nicht vollständig durchmischt. Die im Modellansatz erlaubte „Auffüllung“ des Beckenvolumens bis auf den vorgegebenen Sollwert führt damit zu einem partiellen Ausstoß noch nicht abgebauten Ammoniums. Durch Reduzierung des „auffüllbaren Beckenvolumens“ lässt sich dieser Modellfehler minimieren. Aus

Bericht DBU-Projekt Phase 2

numerischen Gründen ist es jedoch günstiger den Sollwert kleiner zu wählen als den Überwachungswert.

Grundsätzlich ist der halb-deterministische Ansatz zur Prognose der Ammonium- und Nitratblaufwerte Erfolg versprechend. Allerdings sind insbesondere bei den niedrigen Ammonium-Konzentrationen die Prognosen nicht hinreichend genau. Wird der Ansatz durch Umstellung der Gleichungen direkt zur Regelung des Zuflusses genutzt, sind diese Abweichungen weniger kritisch, da „die auffüllbare Fracht“ (letzter Term in Zähler) den zulässigen Zufluss wesentlich bestimmt. Dieser Term wird bei Annäherung an den Sollwert entsprechend kleiner und begrenzt damit wirkungsvoll den Zufluss auch bei ungenauer Schätzung der Umsatzraten.

Da die Datenanalyse ergab, dass Nitrifikation und Denitrifikation bei Mischwasserbeaufschlagung selten kritisch sind, die Prognosegüte für eine direkte Regelung zurzeit nicht zufriedenstellend ist und die parallele Nutzung zusätzlicher Software auf einer anderen Plattform nötig machen würde, wurde darauf verzichtet, den Zufluss neben der Fuzzy-Regelung mit den beschriebenen unabhängigen Ansätzen zusätzlich zu regeln.

5.2.3 Störgröße durch Prognose einer $\text{NH}_4\text{-N}$ -Fracht-Spitze

Insbesondere zu Beginn von Mischwasserereignissen werden aufgrund des „Wellenausstoßeffekts“ gelöste Abwasserinhaltsstoffe mit dem niederschlagsbedingt erhöhten Zufluss ausgestoßen, ohne dass gleichzeitig eine Verdünnung eintritt (Krebs, 2000). Dieser Effekt wird verstärkt durch die Verdrängung des Abwassers (mit Trockenwetterkonzentration) aus der Vorklärung. Für den Kläranlagenbetrieb ist insbesondere die dadurch verursachte Ammonium-Frachtspitze relevant. Auch auf der Kläranlage Chemnitz treten zu Beginn von Mischwasserereignissen erhöhte Ammonium-Frachten auf (Bild 5.7).

Es sollte deshalb geprüft werden, ob zusätzlich zur Überwachung der Nitrifikation und Denitrifikation der Spülstoßeffekt bei Ereignisbeginn mit Hilfe einfacher empirischer Gleichungen prognostiziert und in eine Zuflussregelung eingebunden werden kann. Entsprechend des Projektansatzes sollte dies ausschließlich auf Basis verfügbarer Messsignale möglich sein.

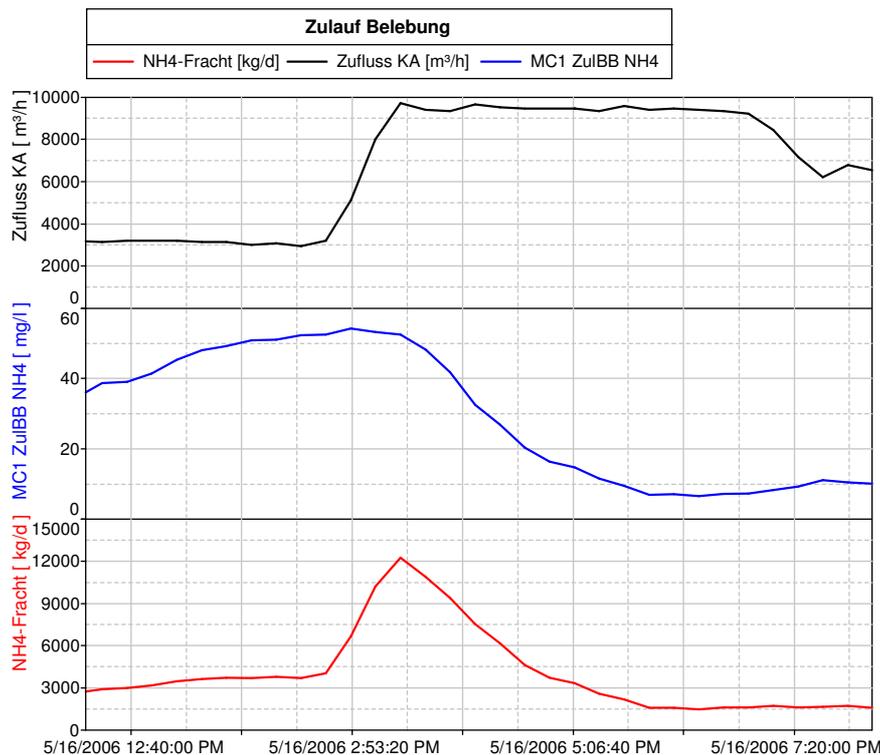


Bild 5.7 Messwerte von Abfluss, NH₄-N Konzentrations- und Frachtganglinie der KA Chemnitz

Als Datenbasis für die Untersuchungen wurden die Messwerte des Zuflusses zur Kläranlage und der NH₄-N-Konzentration im Ablauf des Vorklärbeckens von März bis Oktober 2004 verwendet. Die Datensätze für den Parameter NH₄-N wurden um die Aufenthaltszeit im Vorklärbecken korrigiert und durch lineare Interpolation an den Zeitpunkt der Durchflussmessung angeglichen. Für die Auswertung wurden insgesamt 64 Einzelereignisse mit mindestens 3 Trockenwettertagen zuvor und je einer Fracht- und Durchflussspitze ausgewählt. Der ereignisbedingte Anteil am Gesamtzufluss und der NH₄-Zulauffracht wurde durch Abzug von Trockenwetter-Zufluss und -Fracht bestimmt. Hierfür wurden charakteristische Trockenwetterganglinien für Zufluss und Ammoniumkonzentration basierend auf den Trockenwettertagen wenige Wochen vor und nach dem Ereignis angesetzt.

Mit Hilfe statistischer Datenanalysen wurden die wesentlichen Einflussfaktoren auf die maximale Ammoniumzulauffracht F_{\max} und die Gesamt-Zulauffracht während des Ereignisses F_{summe} ermittelt und anschließend über multiple lineare Regression beschrieben. Zur Vermeidung von Kollinearitäten wurden verschiedene Regressionsgleichungen entworfen. Erwartungsgemäß sind in allen Gleichungen die Frachtspitze und die Gesamtfracht von der Ammonium-Konzentration im Abwasser zu Beginn des Ereignis-

Bericht DBU-Projekt Phase 2

ses abhängig. Hohe Korrelationen bei der Prognose der Frachtspitze ließen sich jedoch nur erreichen, wenn zusätzlich der regenwasserbedingte Zufluss bzw. der Gesamtzufluss während des Ereignisses sowie der daraus abgeleitete Gradient seines Anstiegs als a priori bekannt vorausgesetzt und in die Prognose eingebunden wurden. Die Gesamtfracht ist zusätzlich signifikant von der Dauer Ereignisses abhängig. In Gleichung 20 ist exemplarisch eine Regressionsgleichung für das Frachtmaximum als Funktion der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Anfangskonzentration (c_0), des Zuflusses beim Frachtmaximum (Q_{gesF}) und des Gradienten bis zum Erreichen des Frachtmaximums (dQ_{gesF}/dt) dargestellt. Bild 5.8 zeigt einen Vergleich der Prognose der Frachtspitze mit gemessenen Werten für Mischwasserereignisse im Zeitraum Mai – August 2006. Der mittlere relative Fehler liegt bei 24%. In der Regel wird die Frachtspitze leicht überschätzt.

$$F_{\text{max}} = -53,0 + 0,86 c_0 + 0,44 dQ_{\text{gesF}}/dt + 0,027 Q_{\text{gesF}} \quad (20)$$

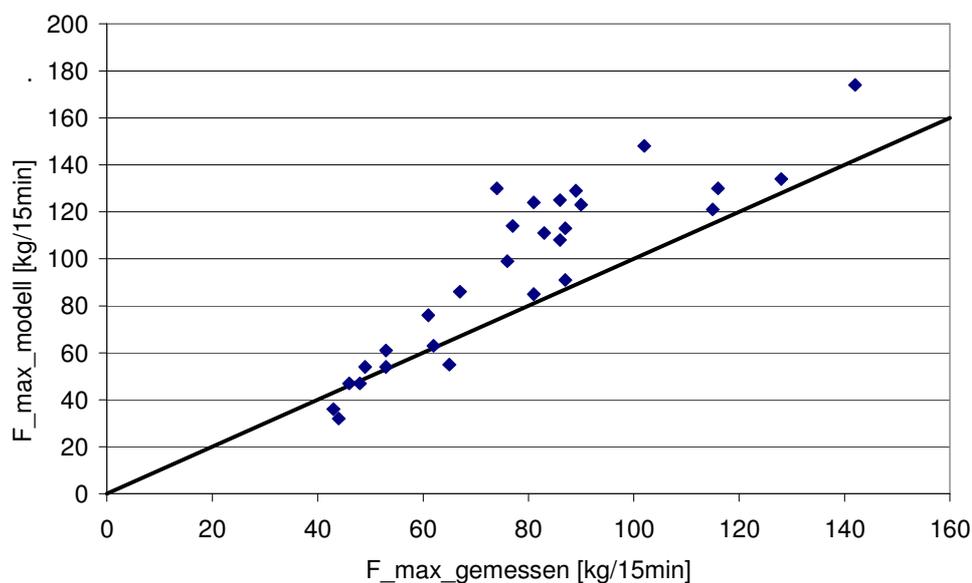


Bild 5.8 Vergleich von gemessener und mittels Gleichung 20 prognostizierter Frachtspitze

Aufgrund der in den Regressionen benötigten Parameter sind die gefundenen Abhängigkeiten nur schwer verwendbar. Während die Ereignisdauer über Radar gestützte Regenprognosen oder mit Regenmessungen mit deutlich weniger Vorlauf abgeschätzt werden könnte, sind Prognosen für den Kläranlagenzufluss über eine ergänzende online Niederschlags-Abfluss-Simulation möglich. Dies sollte im Interesse der zum Ziel gesetzten praxisnahen Umsetzbarkeit vermieden werden.

Bericht DBU-Projekt Phase 2

5.2.4 Hinweise zur Ermittlung der Bereichsgrenzen

Die Störgrößen-Bereichsgrenzen, die im Regelungskonzept integriert sind, werden mit folgender Vorgehensweise ermittelt:

- statistische Auswertung der vorliegenden Messwerte zur Ermittlung von Minimum, Maximum bzw. Summenhäufigkeiten (50%, 95%).
- Ermittlung der Zusammenhänge zwischen Ablaufmesswerten und Prozessmessgrößen, um kritische Bereiche bzw. die Belastungsgrenzen der Kläranlage zu ermitteln (s. Kap. 4.3 bis 4.5).
- Hinzuziehen allgemein anerkannter Vorschriften: DWA Arbeits- und Merkblätter
- Festlegung: Anzahl und Form (Dreiecke oder Trapeze) Fuzzysets, sinnvolle Benennung (hoch, klein, etc.). Eine möglichst einheitliche Festlegung von Form und Namen vereinfacht den Konzeptentwurf.
- Vereinheitlichung und Plausibilitätskontrolle der Bereichsgrenzen: Mittels eines in Excel erstellten Tools zur Kontrolle der gewählten Bereiche (Symmetrie i.O.? etc.) kann eine automatische Überprüfung z.B. anhand des Verhältnisses zum Grenzwert erfolgen (s. Bild 5.9, Bild 5.10).

Grundsätzlich ist die Festlegung der Werte einerseits von der Kläranlage und den vorherrschenden Randbedingungen abhängig, andererseits besteht die starke Wechselwirkung zu den Regeldefinitionen. In dem für Chemnitz erstellten Konzept wurde z.B. konsequent folgende verbale Einteilung verwendet: „niedrig“: Wert geringer als im Mittel, „mittel“: normaler Bereich und „hoch“: höher als im Mittel.

Für die Messwerte im Ablauf der Nachklärung ist der jeweils gültige gesetzliche Grenzwert die maßgebende Grundlage für die Wahl der Bereiche. Wichtig ist die Berücksichtigung der langen Aufenthaltszeit der Nachklärung auch bei Mischwasser (in Chemnitz bei Q_M ca. 4 Stunden). Da aktuell hohe Ablaufwerte weiter ansteigen können bis eine Zuflusssdrosselung wirksam wird, sollte daher ein ausreichender Sicherheitsabstand zum Grenzwert eingehalten werden.

In Tab. 5.2 werden Hinweise gegeben, aufgrund welcher Kriterien die Bereiche der sonstigen Betriebsdaten (beispielhaft für 3 Fuzzysets je Störgröße) sinnvoll ermittelt werden bzw. woran diese sich orientieren können.

Bericht DBU-Projekt Phase 2

Tab. 5.2 Ermittlung der Bereichsgrenzen der Prozessmesswerte

Messwert	Unterer Wert	Mittel	Oberer Wert	Kommentar
O ₂ -Gehalt _{BB}	z.B. 1 mg/L		irrelevant	DWA M265
TS-Gehalt _{BB}	biologische Umsatz bzw. Schlammalter gewährleisten	Bereich, in dem keine Probleme auftreten	Gefahr wegen q _{sv} zu hoch	DWA M266, A131
Schlamm Spiegel (Max-/Mittelwert)	irrelevant		Datenauswertung, Klarwasserzone ok?	A131
TS-Gehalt _{RS}	Via Verhältnis zu TS _{BB}	Aus Messdatenauswertung	Via Verhältnis zu TS _{BB}	A131
VSV	irrelevant		VSV = $q_{sv, max} / (Q_Z/A_{NK})$	A131: max. 600 mL/L, q _{sv} ≤ 500 l/(m ² ·h)
ISV	irrelevant		Max 150 mL/g	A131
NH ₄ -N Abl. BB	irrelevant	Messdatenauswertung (s. 4.3.1)		
PO ₄ -P Abl. BB	irrelevant	Messdatenauswertung		

Nachfolgend wird die Plausibilitätskontrolle der gewählten Bereiche am Beispiel des NH₄-N im Ablauf der Nachklärung aufgezeigt. Um die Überlagerung von verschiedenen Effekten zu vermeiden und nur die Auswirkung dieser einen Störgröße zu prüfen, wird die Annahme getroffen, dass andere Störgrößen nicht relevant sind. Bild 5.9 zeigt die drei definierten Fuzzysets sowie die Zuordnungen in den Regeln (z.B. grün: ≤ niedrig => Erfüllung der Regel 41 => Q_Z = sehr hoch).

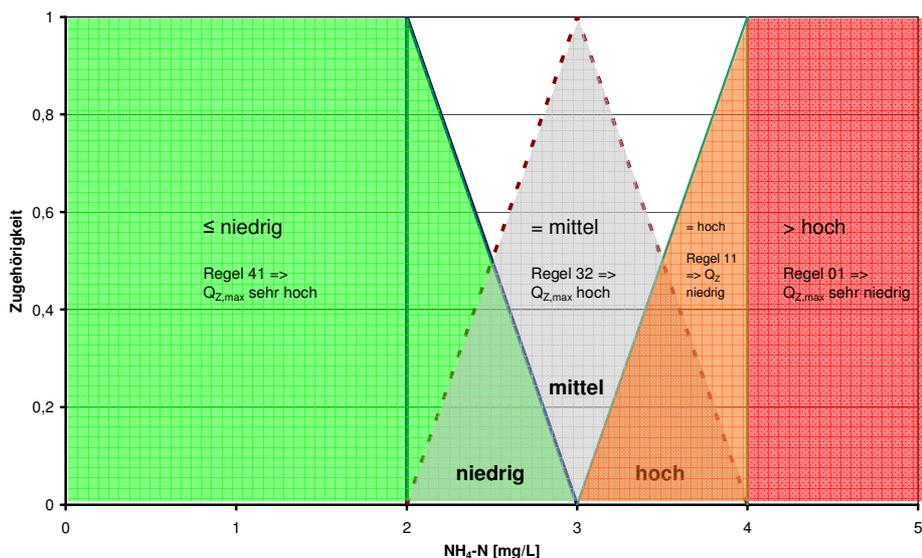


Bild 5.9 Bereichsgrenzen am Beispiel NH₄-N_{AN} und die dann gültigen Regeln

Bericht DBU-Projekt Phase 2

Bild 5.10 zeigt den sich aus den Bereichen und den Regeln ergebenden maximal zulässigen Zufluss zur Kläranlage. Die gewählten Bereiche und die Auswirkungen des Fuzzy-Reglers sowie die Abstände zum Grenzwert erscheinen plausibel. Zugleich wird deutlich, dass das Regelkonzept auf Sicherheit ausgelegt war.

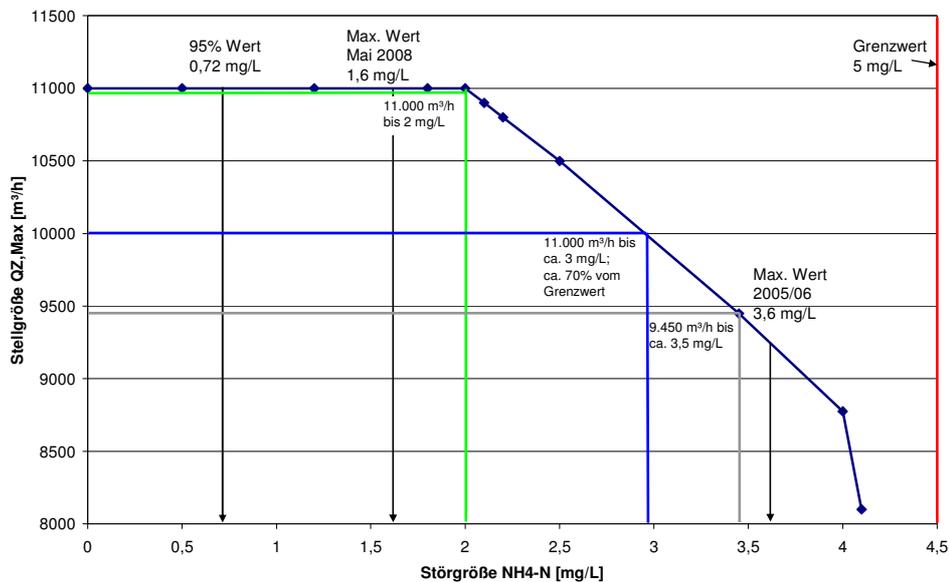


Bild 5.10 Resultierender maximaler Zufluss zur KA bei MW

5.3 Erstelltes Fuzzy-Regelungskonzept für das System in Chemnitz

5.3.1 Übersicht über die Regelbasis

Die Schwachstellen der KA Chemnitz bei Mischwasserzuflüssen wurden in Kap. 4 untersucht. Insbesondere bei hohen Schlammindizes können Probleme beim Absetzvorgang in der Nachklärung auftreten. Diagnostizierte Störungen bei der P-Elimination sind auf eine nicht frachtbasierte Fällmitteldosierung zurückzuführen. Probleme zur Einhaltung des Stickstoffablaufgrenzwertes traten infolge unzureichender Denitrifikation bei Trockenwetterbedingungen auf. Vor der bei Mischwasser üblichen Verdünnung des hohen Nitratgehalts führte die Überlagerung mit einem leichten $\text{NH}_4\text{-N}$ -peak zu hohen Gesamtstickstoffwerten. Die Nitrifikation an sich ist normalerweise in Chemnitz, auch in den Wintermonaten, kein kritischer Prozess (max. 5 mg/L von 2004 bis 2006).

Um diese oben genannten Schwachstellen bei der Erhöhung des Mischwasserzuflusses dynamisch zu berücksichtigen, wurde das in Bild 5.11 skizzierte Steuerungssystem entworfen. Der Schieber im Zulauf zur Kläranlage ist das Stellorgan, mit dem sich die **Stellgröße** einstellen lässt, deren Regelbereich zwischen 8.100 und 11000 m^3/h gewählt wurde. In den großtechnischen Versuchen wurde aus Sicherheitsgründen und zur Überprüfung der Funktionstüchtigkeit des Systems als obere Grenze zunächst 9.450 m^3/h gewählt, entsprechend des aktuell maximalen Mischwasserzuflusses.

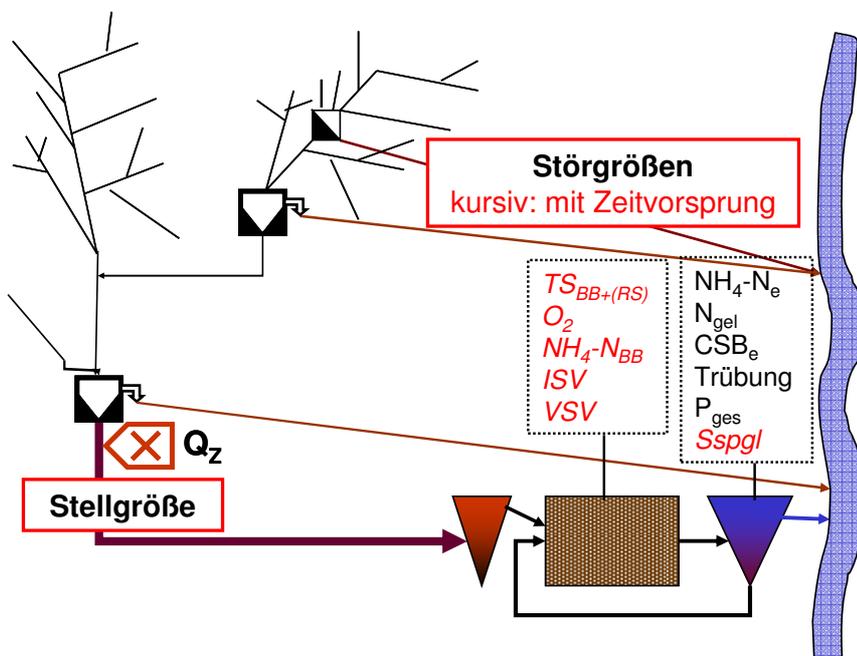


Bild 5.11 Skizze des integrierten Steuerungssystems

Bericht DBU-Projekt Phase 2

Als **Störgrößen** werden die gemessenen Ablaufwerte sowie Betriebsgrößen hinzugezogen, an Hand derer sich kritische Zustände mit einem gewissen Zeitvorsprung prognostizieren lassen:

- Schlamm Spiegel im Nachklärbecken
- TS-Gehalt in Belebungsbecken
- Trübung, $\text{NH}_4\text{-N}_{\text{AN}}$, CSB_{AN} , $\text{N}_{\text{gel,AN}}$ und $\text{P}_{\text{ges,AN}}$ im Ablauf der Nachklärung
- Sauerstoffgehalt im letzten Nitrifikationsbecken
- $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalt im Belebungsbecken
- Schlammvolumen und Schlammindex

Die in CONTROL definierten Messgrößen, die direkt aus den Kläranlagen-Daten eingelesen werden sowie die „Rechenwerte“, die in CONTROL ermittelt werden, sind im Anhang in Tab. 10.5 und Tab. 10.6 dargestellt.

Tab. 5.3 zeigt eine Übersicht über die Regelbasis und die definierten Regelgruppen. Der Zustand „Zufluss sehr niedrig“ wird z.B. eingenommen, wenn eine Überschreitung der Ablaufgrenzwerte droht, so dass eine akute Gewässerbelastung vermieden wird. Dieser Zustand hat oberste Priorität, d.h. andere Regeln können zu dieser Zeit nicht gelten. (Anmerkung: Bei der Umsetzung in Chemnitz wurde letztlich im Rahmen der Versuche in Absprache mit Betreiber und Behörde keine Reduzierung des Zuflusses vorgenommen).

Bericht DBU-Projekt Phase 2

Tab. 5.3 Übersicht Regelbasis: Beschreibung der definierten Regelgruppen

Regel-Gruppe	Ziele	Stellgröße Q_{zu} im Regler	Umsetzung Mai/Juni08 Q_{Max}
Regeln 0XX	Verhinderung der unmittelbar bevorstehenden Überschreitung behördlicher Überwachungswerte. Greift zu 100%, wenn bereits ein Überwachungswert > hoch ist!	Sehr niedrig 8.100 m ³ /h	IST-Wert 9450 m ³ /h
Regeln 1XX	Verhinderung der Überschreitung Überwachungswerte. <ul style="list-style-type: none"> wenn mind. ein Überwachungswert = hoch ist. und / oder <ul style="list-style-type: none"> Absetzen NK rechnerisch sehr kritisch: Schlamm Spiegel > hoch, qsv bzw. VSV > hoch NH₄-N im Belebungsbecken ≥ hoch 	Niedrig 8.775 m ³ /h	
Regeln 2XX	<ul style="list-style-type: none"> mindestens 2 Überwachungswerte sind zeitgleich „nur“ = Mittel und / oder Betriebsgrößen (TS, RS, O₂) in Randbereich (< niedrig, > hoch) Absetzen NK rechnerisch behindert: ISV > 130 mL/L, VSV > 400, Schlamm Spiegel = hoch NH₄-N im Belebungsbecken = hoch 	Mittel = $Q_{z,MW}$ IST 9.450 m ³ /h	
Regeln 3XX	Alle maßgebenden Störgrößen weisen auf problemfreien Betrieb der KA hin. Gefährdung der Überwachungswerte steht nicht an. <ul style="list-style-type: none"> Überwachungswerte: max. einer ist = Mittel, Sonstige ≤ niedrig und / oder <ul style="list-style-type: none"> NH₄-N im Belebungsbecken = mittel und <ul style="list-style-type: none"> Betriebsgrößen (TS, O₂) in normalem Bereich (= Mittel) Absetzen NK rechnerisch problemfrei (ISV ≤ 130 mL/L, VSV ≤ 400, SSpg < hoch) 	Hoch 10.000 m ³ /h	Hoch 10.000 m ³ /h
Regeln 4XX	Alle maßgebenden Störgrößen weisen auf problemfreien Betrieb der KA hin. Gefährdung der Überwachungswerte steht nicht an. <ul style="list-style-type: none"> Alle Überwachungswerte ≤ niedrig und <ul style="list-style-type: none"> Betriebsgrößen (TS, O₂) in normalem Bereich Absetzen NK rechnerisch problemfrei (wie unter 3XX) NH₄-N im Belebungsbecken ≤ 5 mg/L 	Sehr hoch 11.000 m ³ /h	

Liegt einer der Überwachungswerte bereits im hohen Bereich, nimmt der Zufluss den Zustand „niedrig“ an. Sind hingegen alle Kontrollparameter bzw. Störgrößen in unbedenklichen Wertebereichen, kann der Zufluss einen „sehr hohen“ Wert annehmen. Die Regel 41 besagt z.B., dass der Zufluss zur KA „sehr hoch“ (11.000 m³/h) sein darf, wenn alle Randbedingungen in Ordnung sind bzw. die Parameter, die im Hinblick auf die Überwachungswerte relevant sind, kleiner oder gleich „niedrig“ sind.

Die Regelbasis ist in Tab. 5.4 in Form einer gekürzten Regelmatrix dargestellt (Vollständige Regelmatrix s. Anhang). In dieser Form erfolgte die Implementierung in CONTROL, d.h. dort sind sämtliche Regeln programmiert

Als von der Regelbasis unabhängige Randbedingung wurde zur Vermeidung von starken Schwankungen des Zuflusses weiterhin definiert, dass nach einer Reduzierung des Sollwertes dieser kleinere Wert mindestens 60 Minuten gehalten wird, bevor ein erneuter Anstieg zulässig ist.

Bericht DBU-Projekt Phase 2

Tab. 5.4 Gekürzte Regelmatrix

Re gel	Eingangsgrößen									Ausgangsgröße
	Betriebsgrößen			„Prognose“ Absetzkapazität NK			Behördliche Überwachungs- werte Ablauf NK			Regelinterpretier
	O ₂	TS _{BB}	NH ₄ -N _{BB}	ISV	VSV	Max. u. Ø SSpg	NH ₄ -N _{AN}	P _{ges,AN}	Weitere	Q _{zu}
01							> Hoch			sehr niedrig (8.100 m ³ /h)
04								> Hoch		
0X	Weitere 3 Regeln									
11							hoch	≤ hoch		niedrig (8.775 m ³ /h)
14							≤ hoch	hoch		
17			> hoch				≤ hoch			
18					> hoch					
19						> hoch				
1X X	Weitere 4 Regeln									
21	< niedrig						< hoch			"normal" (9.450 m ³ /h)
22			hoch							
23				≥ hoch						
24		> hoch								
2X	Weitere 13 Regeln...									
31			0 – 5 (< hoch) = mittel	0-130 < hoch	0-400 (<hoch)	0 - 2,2 (< hoch)	≤ niedrig	≤ niedrig		hoch (10.000 m ³ /h)
32							mittel	≤ niedrig		
33							≤ niedrig	≤ niedrig		
34							≤ niedrig	mittel		
35	1 – 10 (≥ mittel)	2,5 - 4 (= mittel)					≤ niedrig	≤ niedrig		
36			≤ niedrig	≤ niedrig						
41			0 - 5				≤ niedrig	≤ niedrig		sehr hoch (11.000 m ³ /h)

5.3.2 Festlegung der Bereichsgrenzen

In Tab. 5.5 sind die zugehörigen Bereichsdefinitionen der Messwerte dargestellt. Die Messgrößen, die in CONTROL eingelesen werden sowie in CONTROL erzeugte Rechenwerte sind im Anhang in Tab. 10.5 und Tab. 10.6 zusammengestellt.

Die Zuordnung für das Steuerelement (Zufluss KA) sind Bild 5.2 (rechts) zu entnehmen.

Die meisten Definitionen wurden analog zu Bild 5.2 mit dreieckförmigen Sets erstellt. Die Fuzzy-Sets der in Tab. 5.5 mit ²⁾ gekennzeichneten Störgrößen sind mit trapezförmigen Sets definiert, um den Anforderungen besser gerecht zu werden. Bild 5.12 zeigt exemplarisch die Bereichseinteilung für den Messwert P_{ges} im Ablauf der Kläranlage.

Bericht DBU-Projekt Phase 2

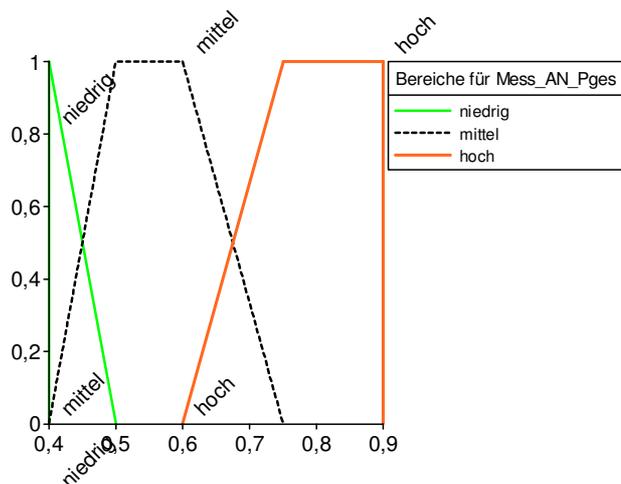


Bild 5.12 Zugehörigkeitsfunktionen für das Messelement P_{ges}

Tab. 5.5 Bereichsdefinition der verwendeten Störgrößen

Messwert (Name in Control)	MW ¹⁾	niedrig	mittel	Hoch	Erläuterung	Kontrollziel
Mess_BB_NH4N [mg/L]	n.e.	4	5	7	30% Redu. zu AN	SmP
Mess_BB_PO4P [mg/L]	n.e.	0	0,8	1,6		
RW_BB1_6_MW_O2_4 ²⁾ [mg/L]	n.e.	1	1,5 - 2	3		Ungewöhnlicher Betriebszustand
RW_BB_MW_TS1_6 ²⁾ [g/L]	n.e.	2,5	3 - 4	4,5		
Mess_BB_ISV_L [ml/g]	110	100	130	150		
Mess_BB_SV [ml/L]	392	330	400	500	>500 => qsv ≥ 500 400 => qsv ≈ 420	
RW_NK1-4_MW_Sspgl ²⁾ [m]	n.e.	1	1,5 - 2,2	2,5		
RW_NK1-4_Max_Sspgl ²⁾ [m]	n.e.	1	1,5 - 2,2	3		
Mess_AN_NH4N [mg/L]	0,1	2	3	4	gesetzl. Grenzw.: 5	N
RW_AN_Ngel [mg/L]	8,6	11	12,5	14	Grenzwert: 16,5, angestrebt 13	DN, N
Mess_AN_CSB [mg/L]	21	45	50	55	gesetzl. Grenzwert: 60	Absetzen
Mess_AN_Pges ²⁾ [mg/L]	0,3	0,4	0,5 - 0,6	0,75		Absetzen, P-Eli
Mess_AN_Trueb [TE/F]	2,5	10	15	20		Absetzen
		TW	Übergang	RW		
Mess_Z_Q ²⁾ [m ³ /15min]	n.e.	0 - 1200	1000 - 1300	1200 - 3000		

Erläuterung:

Werte gelten für die Zugehörigkeit = 1 des jeweiligen Bereichs („niedrig“ etc)

¹⁾ MW: Mittelwert Messdaten 2004 + 09/05-10/06

²⁾ trapezförmige Sets definiert

5.4 Simulative Erprobung und Optimierung des Reglers

Erprobung und Optimierung des Regelungskonzeptes wurden mit den in Kap. 3.4.2 dargestellten Regenereignissen durchgeführt. Die definierten Bedingungen konnten mithilfe von integrierten Simulationen (Kap. 3.3) auf Plausibilität getestet sowie die Regeln auf korrektes Zusammenwirken überprüft werden. Nachfolgend sind die Ergebnisse der Simulationen für die Ereignisse mit der Endversion des Reglers zusammengefasst.

Ereignisse 009 und 013

Bei diesen Ereignissen im Juli 2007 traten im IST-Zustand keine Probleme mit den Ablaufwerten auf. Dieser Lastfall diente dazu, den Regler auf seine Fähigkeit zu testen, bei „normalen“ Randbedingungen die Zuflusserhöhung auf 11.000 m³/h vorzuschlagen. Bild 5.13 zeigt die Gegenüberstellung der drei betrachteten Lastfälle für Q_Z: (IST (9.450 m³/h), MAX (11.000 m³/h), RTC (geregelt bis 11.000 m³/h)). Es wird deutlich, dass die Veränderung der Ablaufwerte nur sehr gering ist. Der Zufluss wurde bei der geregelten Variante insbesondere zu Beginn der Peaks reduziert.

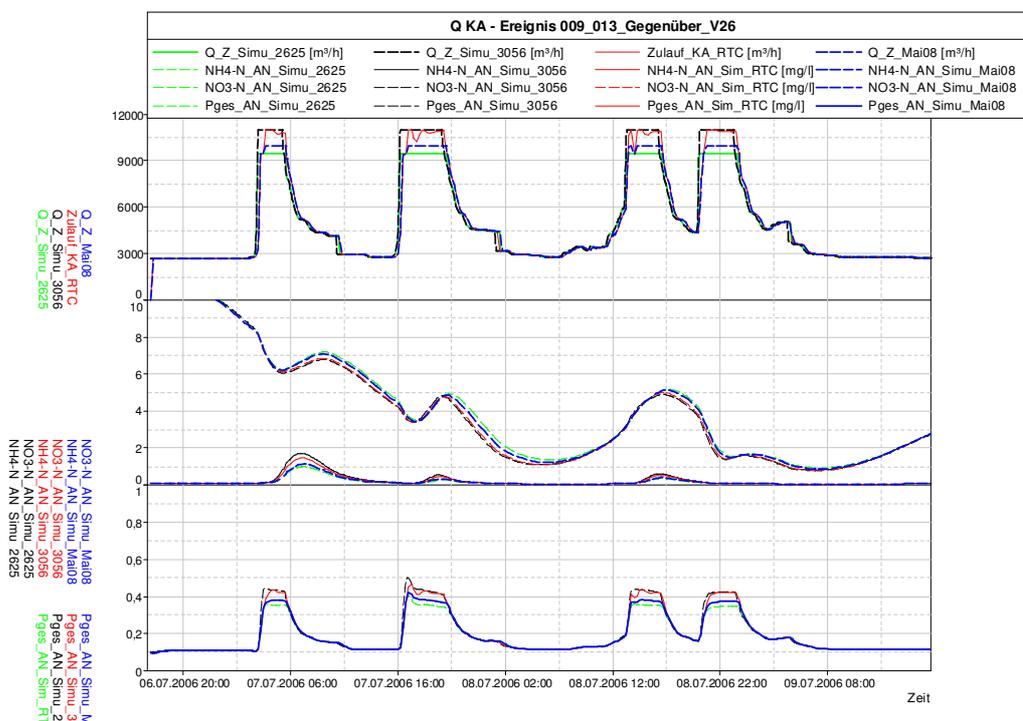


Bild 5.13 Ereignis 009-013, Gegenüberstellung der Lastfälle Q_Z: IST (9.450 m³/h), MAX (11.000 m³/h), RTC (geregelt bis 11.000 m³/h)

Bericht DBU-Projekt Phase 2

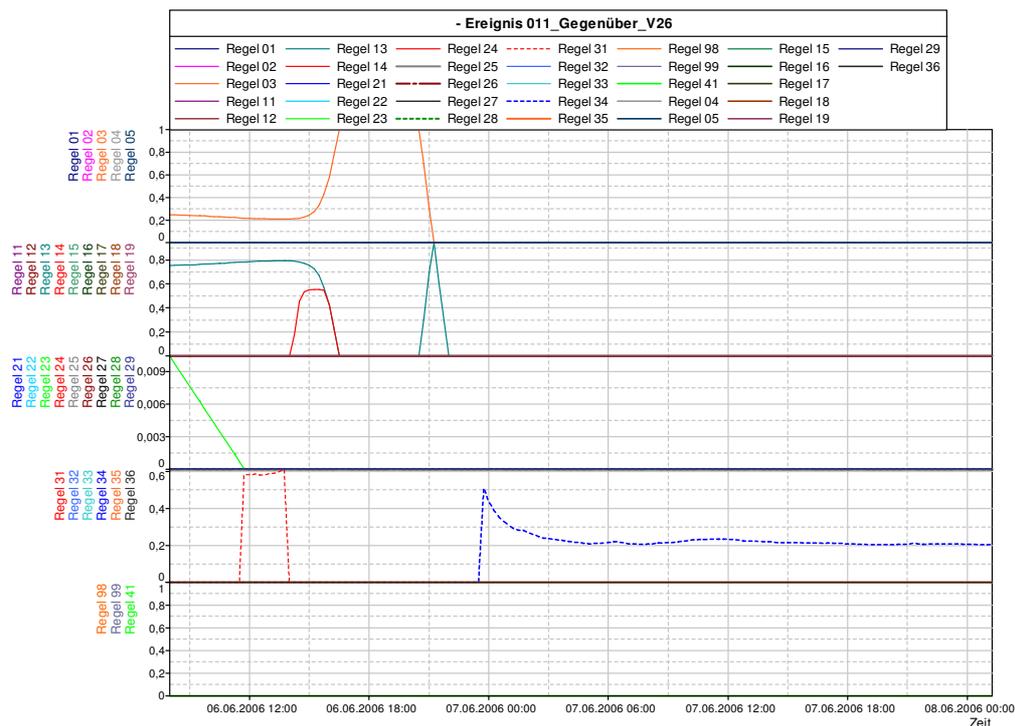


Bild 5.15 Aktive Regeln in Ereignis 011

5.5 Automatisierte Plausibilitätskontrolle der messtechnisch erfassten Störgrößen und Ersatzwertkonzepte

Für automatisierte Steuerungssysteme ist es wichtig, die in das Konzept eingebundenen messtechnisch erfassten Störgrößen auf Plausibilität zu prüfen und gegebenenfalls, je nach Wichtigkeit des Wertes, Ersatzwertkonzepte bzw. redundante Messungen zu schaffen. Zielsetzung ist es, im Regelkonzept nur korrekte Messwerte Einfluss nehmen zu lassen. Ist ein Wert fehlerhaft und kein Ersatzwert verfügbar, darf die Regel, in die dieser Wert eingeht, nicht aktiv werden.

Folgendes Vorgehen sollte für jeden Messwert einzeln durchgeführt werden:

- Überprüfung historischer Messdatenreihen auf Fehler.
- Erarbeitung von einfachen Konzepten zur automatisierten Fehlererkennung.
 - Festlegen sinnvoller Bandbreiten, d.h. von Minimal- und Maximal-Werten.
 - Festlegung von Gradienten: maximal mögliche bzw. minimal erforderliche Wert-

Bericht DBU-Projekt Phase 2

änderung (z.B. Ausfall, wenn Wert über 5 Stunden gleich ist).

- Vergleich mit ähnlichen Werten, z.B. kann $\text{NH}_4\text{-N}$ im Ablauf der KA nicht höher sein als im Ablauf der Belebung unter Berücksichtigung des Zeitversatzes (Aufenthaltszeit in der Nachklärung).
- Ermittlung von Ersatzwertkonzepten, falls dies möglich ist.
- Festlegung von Vergleichen mit manuellen Referenzmessungen.

Im Rahmen des Forschungsprojektes erfolgte eine Untersuchung bisher nur in begrenztem Maße (s. unten: TS-Gehalt). Bei dauerhafter Umsetzung ohne die tägliche manuelle Systemkontrolle, wie sie im Projekt möglich war, ist ein solches Konzept für sämtliche, als Störgrößen fungierende Messwerte zu ergänzen. Die Messdatenauswertung zeigte, dass an jedem Messwert auch Fehler auftreten. Die Bandbreite erstreckt sich von Ausfall („Festfrieren des alten Wertes“) über Drift bis zu systematischen Abweichungen.

Wenn keine Ersatzwerte bereitgestellt werden können, wird zur Absicherung des Regelungskonzeptes eine Bandbreite für gültige Werte vorgegeben. Werte außerhalb dieser Bandbreite können nicht zur Aktivierung von Regeln und damit nicht zur Erhöhung des Zuflusses führen. Eine Meldung für den KA-Betrieb ist wichtig, so dass eine sofortige Instandsetzung erfolgen kann.

Messwertkontrolle am Beispiel des TS-Gehalts

Der TS-Gehalt im Mittel aller Belebungsbeckenstraßen geht in das Regelungskonzept ein. Es liegen einerseits Online-Messungen in jeder der sechs Straßen vor, andererseits werden tägliche Laboruntersuchungen durchgeführt. Weiterhin werden Referenzwerte für die Online-Sonden erhoben und diese damit nachkalibriert.

Die Analyse der Online-Messdaten zeigt folgende Sachverhalte:

- Die Online-Werte weichen z.T. deutlich von den Laborwerten (2004 - 2006 zwischen 2,8 – 4,4 g/L) ab, Minimal- und Maximalwerte verlassen häufig sinnvolle Wertebereiche.
- Vereinzelt ist ein langsamer Messwertdrift zu beobachten.
- Die TS-Gehalte sind im Vergleich der Straßen vereinzelt sehr unterschiedlich (in Labormessungen bis zu 1 g/L, im Mittel 0,13 g/L). Neben üblichen Messungenauigkeiten ist ein Trend erkennbar, dass die Straßen nicht immer identisch betrieben

Bericht DBU-Projekt Phase 2

werden. Straße 5 hat eher niedrige, Straße 6 eher höhere TS-Gehalte.

Infolge der Erkenntnis, dass die TS-Gehalte der einzelnen Straßen um bis zu 1 g/L voneinander abweichen können, kann eine Plausibilitätskontrolle der einzelnen Messungen durch den Vergleich mit den Werten der parallelen Straßen nicht erfolgen.

- Die Gegenüberstellung der Laborhandwerte (Mittelwert der 6 Straßen vs. Probenahme im Ablauf der 6 Straßen nach Vermischung) zeigt, dass auch hier Abweichungen von bis zu 0,7 g/L auftreten können. Gründe können eine nicht repräsentative Probenahme (keine vollständige Durchmischung) bzw. Ungenauigkeiten bei der Analytik sein. Demnach kann nicht nur der Online-Wert sondern auch der Laborwert fehlerbehaftet sein.

Theoretische Betrachtungen mittels einer Schlammmassenbilanz zeigen, dass bei plötzlichem Anstieg von Trockenwetterzufluss auf das Maximum von 11.000 m³/h und einem Ausfall des Rücklaufschlammstroms der TS-Gehalt in der Belebung in 10 Stunden von 3,6 auf 1,0 g/L sinken kann. Der mittlere Gradient dieser Extremsituation beträgt 0,065 g/L pro 15min. Da es sich in der Tat um eine asymptotisch verlaufende Funktion handelt, ist der Gradient am Anfang deutlich höher. Dieser anfängliche hohe Gradient stellt einen theoretisch möglichen Maximalwert für die Veränderung des TS_{BB} dar.

Die **Plausibilitätskontrolle** für den Messwert jeder Straße wird daher an Hand der folgenden Kriterien durchgeführt:

- **Min/Max:** Online-Messwerte größer 5 g/L und kleiner 1,5 g/L sind fehlerhaft.
- **Gradienten:** Wertänderung in 15-min-Zeitschritten > 0,2 g/L (entsprechend der oben erläuterten Betrachtung) sind auf Störungen an der Sonde zurückzuführen. Wertänderungen < 0,01 in 24 Stunden sind ebenfalls unrealistisch.

Fehlerhafte Messwerte werden nicht in die Ermittlung des Mittelwertes aller Straßen einbezogen. Bei der Anwendung der Kriterien auf die Datenreihe wurden 6% der Online-Messwerte als fehlerhaft erkannt. Durch die Korrektur nähert sich die Ganglinie der Tagesmittelwerte aus Onlinemessungen den täglichen Labormesswerten an, jedoch ist die erreichte Güte noch nicht zufriedenstellend (Bild 5.16). Je Straße sind Fehler um bis zu 0,65 g/L im Tagesmittel nicht vermeidbar. Im Mittel beträgt die Abweichung ca. 0,19 g/L (ohne Fehlerbereinigung: 0,24 g/L).

Bericht DBU-Projekt Phase 2

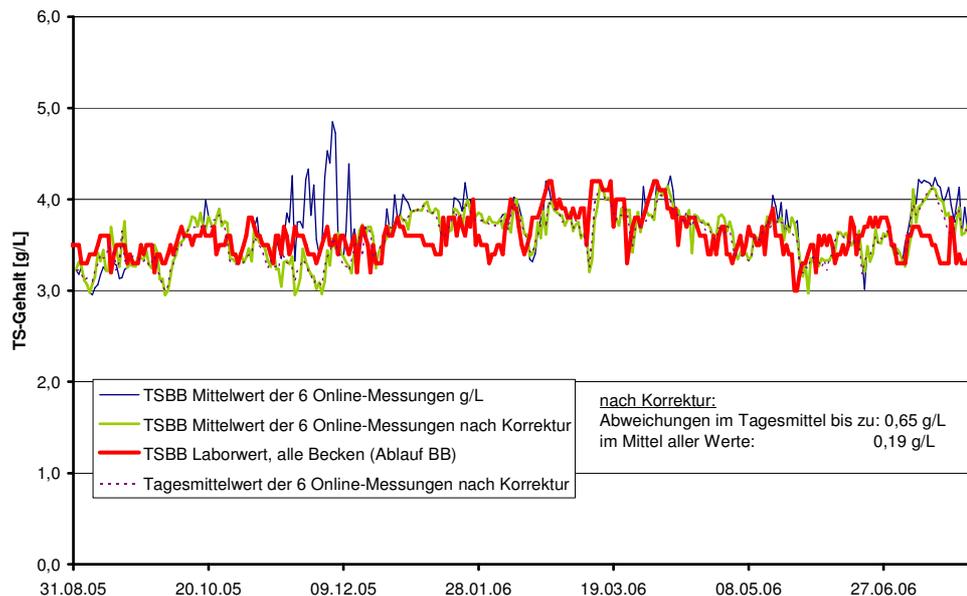


Bild 5.16 Vergleich der mittleren TS-Gehalt vor und nach einer Korrektur

Dieser verbleibende, mögliche Fehler muss bei der Erstellung des Regelungskonzeptes berücksichtigt werden. Den Labormesswert als Ersatzwert einzubeziehen ist nicht sinnvoll, da die Dynamik infolge Mischwasser nicht abgebildet werden kann. Gegebenenfalls könnte eine Kombination von Labor und Onlinewert hinzugezogen werden.

6 Großtechnische Anwendung auf der KA Chemnitz

6.1 Zeitrahmen und Vorgehensweise

Im Rahmen des Projektes wurde in Zusammenarbeit mit den Stadtwerken Chemnitz (SWC) als Betreiber von Kanalnetz und Kläranlage eine integrierte Bewirtschaftung im EZG Chemnitz praxisnah umgesetzt. Die großtechnischen Untersuchungen wurden über einen Zeitraum von 4 Monaten (1. Mai bis 31. August 2008) in enger Absprache mit der zuständigen Überwachungsbehörde (Regierungspräsidium Chemnitz), die für den Versuchszeitraum eine Sondergenehmigung erteilte, durchgeführt. Folgender gestufter Zeitplan wurde im Hinblick auf die Anlagensicherheit befolgt:

- April 2008: Installation der Hardware vor Ort.
- Vorstellung des entworfenen Konzepts und der Ergebnisse der simulativen Reglererprobung vor Betreiber und Behörde. Diskussion der festgelegten Störgrößen und Bereichsgrenzen (Ende April 2008).
- 01. 05. bis 14.07.2008: Höherbeschickung der Kläranlage bis maximal 10.000 m³/h, was einer Erhöhung gegenüber der wasserrechtlichen Genehmigung (9.450 m³/h) um ca. 6% entspricht. Der Regler gibt eine Empfehlung an das Klärwerkspersonal ab, ob der Maximalwert 9.450 m³/h oder 10.000 m³/h betragen soll. Die Auswertung der Untersuchung wird Betreiber und Behörde vor einer Zustimmung zur nächsten Phase vorgestellt.
- 15.07. bis 31.08.2008: Höherbeschickung der Kläranlage bis maximal 11.000 m³/h (Erhöhung gegenüber IST ca. 16%). Die Umsetzung der Empfehlung erfolgt erneut manuell in nun 4 Stufen: 9.450 m³/h, 10.000 m³/h, 10.500 m³/h bzw. 11.0000.

Der Reduzierung des Mischwasserzuflusses bei gegebenenfalls bevorstehenden Grenzwertüberschreitungen war in dieser Projektphase zunächst nicht gewünscht.

Ein automatisierter Betrieb war je nach Projektfortgang für den Monat August vorgesehen. Aufgrund der langen Trockenwetterperiode im Mai 2008 konnte dies aus Zeitgründen nicht mehr realisiert werden. Aufgrund der PC-gestützten Protokollierung der Eingriffe durch das Klärwerkspersonal wurde jedoch deutlich, dass die manuelle Einstellung der vorgeschlagenen Werte zeitnah zur Sollwertänderung erfolgte. Bei einer Automatisierung wären identische Ergebnisse erzielt worden. Neben der täglichen Fernkontrolle des Regelrechners und der zeitnahen Auswertung der Ereignisse war insbesondere der direkte Kontakt zur Betriebsleiterin der Kläranlage sehr hilfreich für die Kontrolle und Verbesserung des Regelungskonzepts. So wurden Informationen zum Regler bzw. zu sonstigen Besonderheiten auf der Kläranlage übermittelt.

Bericht DBU-Projekt Phase 2

6.2 Installation vor Ort

Bild 6.1 zeigt die Anbindung des Reglers an die Strukturen der Kläranlage Chemnitz. Das Leitsystem (Siemens LSX) sammelt einerseits sämtliche Messsignale und nimmt andererseits die Steuerung der Schieber, Pumpen etc. vor. Parallel ist ein Assistenzsystem zur Betriebsführung (UMOS, Fa. OPTUM Systemtechnik, Chemnitz) installiert, welches die Daten aus dem LSX (15-min-Zeitschritte) sowie aus der Labor-Datenbank (LIMS) in eigene offene Datenbanken transferiert.

Der im Rahmen des DBU-Projektes auf der Leitwarte installierte Rechner kann dort an das Netzwerk angeschlossen werden und greift aus der UMOS-Oracle-Datenbank die für das Regelungskonzept erforderlichen Messwerte (15-min- und Tageswerte) ab. Da die Mittelwertbildung aus 1-min-Werten im LSX erst einige Minuten nach Ende des Zeitintervalls durchgeführt wird, stehen die Messwerte dem Regler ebenfalls mit einer Verzögerung von ca. 4-5 Minuten zur Verfügung.

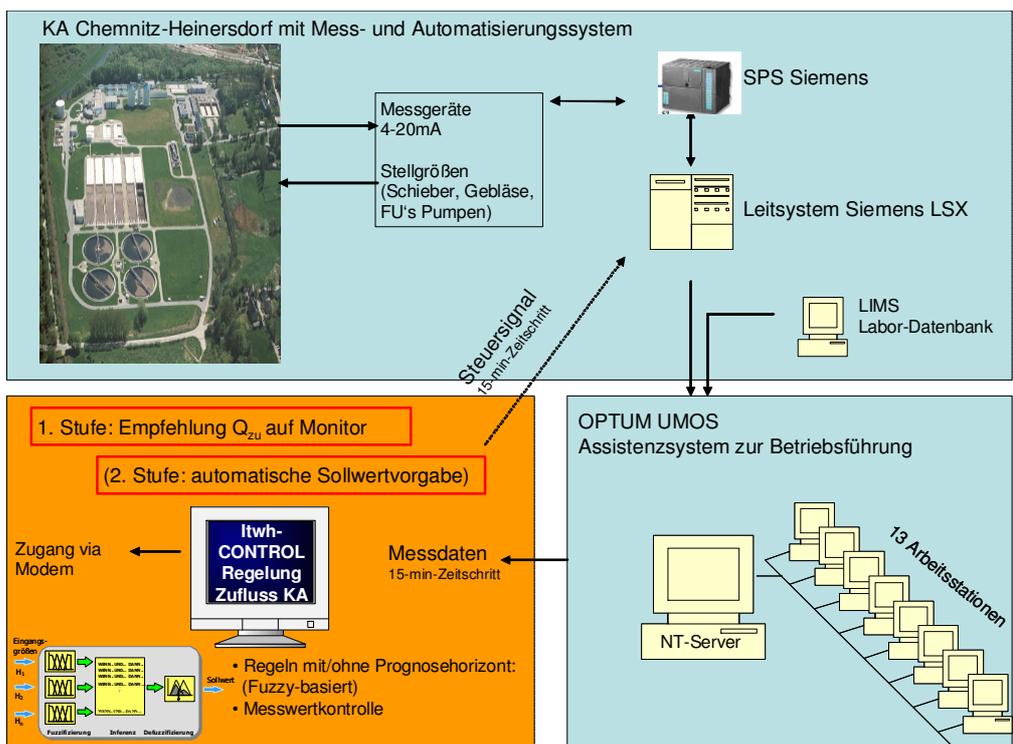


Bild 6.1 Anbindung des Reglers an das Leitsystem der KA Chemnitz

Um eine automatisierte Steuerung betreiben zu können, müsste der Rechner parallel an dieses Netzwerk angeschlossen werden. Wie oben bereits erläutert, wurde aufgrund des kurzen Versuchszeitraums und der sehr zeitnah möglichen manuellen Sollwert-Umsetzung, diese 2. Stufe im Rahmen des Projektes nicht durchgeführt.

Bericht DBU-Projekt Phase 2

Auf dem „DBU-Regelungsrechner“ wurden neben der Windows-Standard-Software folgende Zusätze installiert und eingerichtet:

- Programmiertes Tool zum Auslesen der OPTUM-Datenbank. Dieses greift auf eine im csv-Format abgelegte Tabelle (names Tab.csv) zu, in der die Signalnummern der aus der Datenbank auszulesenden Messwerte abgelegt sind. Diese Tabelle kann jederzeit flexibel an die gewünschten Daten angepasst werden.
- itwh-Software CONTROL (als Dienst zu starten). Das auf Fuzzy-Logik basierende, entworfene Regelungskonzept wird in der sogenannten Parameterdatei (xml-Format) gespeichert (Regeln, Störgrößen, Bereich etc.). Dieses kann auf dem Online-PC nach einer Offline-Überarbeitung, z.B. am Büro-PC, beliebig ausgetauscht und durch den Neustart des Dienstes aktiviert werden. Kleine Änderungen sind somit unkompliziert möglich. Die verarbeiteten Messdaten, die Erfüllungsgrade der Regeln und die ermittelten Werte für die Stellgröße werden in einer log-Datei pro Tag (Datum und Uhrzeit im Dateinamen) aufgezeichnet.
- Programmiertes Tool, das den Sollwert aus CONTROL auf dem Bildschirm anzeigt. Bei einer Wertänderung von Q_z zeigt der sonst schwarze Bildschirm auffällig (s. Bild 6.2) den einzustellenden Wert an. Parallel wird ein Windows-Standard-Sound aktiviert, der dem Betriebspersonal auf der Leitwarte auch akustisch die Änderung mitteilt. Dieser wird erst beendet, wenn eine manuelle Bestätigung per Mausklick erfolgt (Aufzeichnung der Bestätigungszeit in zusätzlicher log-Datei).

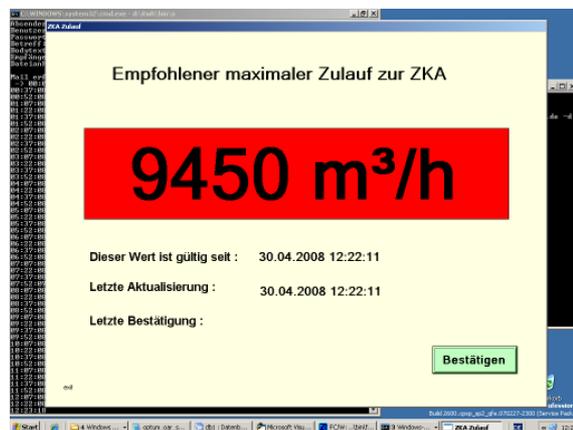


Bild 6.2 Sollwertvorgabe auf dem Monitor des in Chemnitz installierten PC

- Fern-Login mit der in Windows standardmäßig verfügbaren Software „Ultra-VNC“. Trotz langsamer Modem-Verbindung konnten Daten gesichert, neue Regelungsversionen aktiviert und das System überprüft werden.
- Automatischer Email-Versand der täglichen Log-Datei über den OPTUM-Account

6.3 Ergebnisse der großtechnischen Versuche

6.3.1 Übersicht über den Versuchszeitraum

Im Zeitraum vom 1. Mai bis Anfang Juni verlief die Versuchsphase infolge unterschiedlichster Ursachen ohne brauchbares Steuerungsereignis. Im Einzelnen waren dies ein anfänglicher Messfehler, sehr lange Trockenwetterperioden, eine fehlerhafte Bereichsdefinition und ein Blitzschlag auf der Kläranlage, der zu einem Rechnerausfall führte. Bild 6.3 zeigt für diesen Zeitraum den gemessenen Zufluss zur Kläranlage (Mess_Z_Q) und den Sollwert für den Zufluss (Steuer_Z_Q).

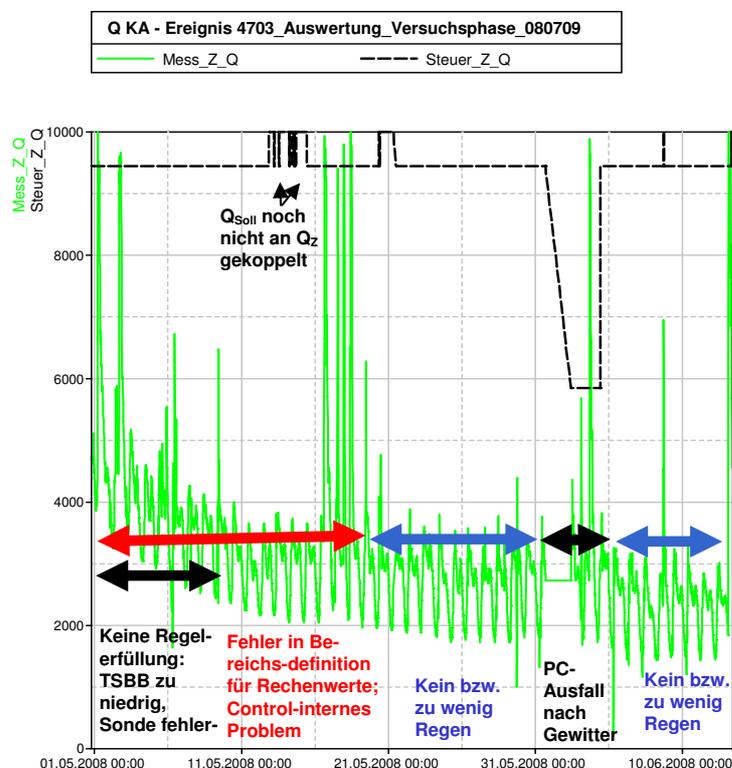


Bild 6.3 Übersicht über die Versuchsphase: Mai-Anfang Juni

Nach dieser „Anlaufphase“ fanden im verbleibenden Untersuchungszeitraum von Mitte Juni bis Ende August insgesamt 18 Regenereignisse statt, bei denen der Regler eingegriffen hat (davon 8 Ereignisse mit maximalen Zuflüssen bis 10.000 m³/h und 10 bis 11.000 m³/h). Bild 6.4 zeigt Messwert und Sollwert des Zuflusses zur Kläranlage. Teilweise kann der Sollwert aufgrund eines zu geringen Mischwasseranfalls nicht erreicht werden, vereinzelt liegt der tatsächliche Zufluss aufgrund des trägen Zulaufschiebers kurzfristig oberhalb des Sollwertes. In diesen 2,5 Monaten wurde der Maximalzufluss von 11.000 m³/h in Summe über insgesamt 7-8 Stunden erreicht (≥ 10.000 ca. 35 h).

Bericht DBU-Projekt Phase 2

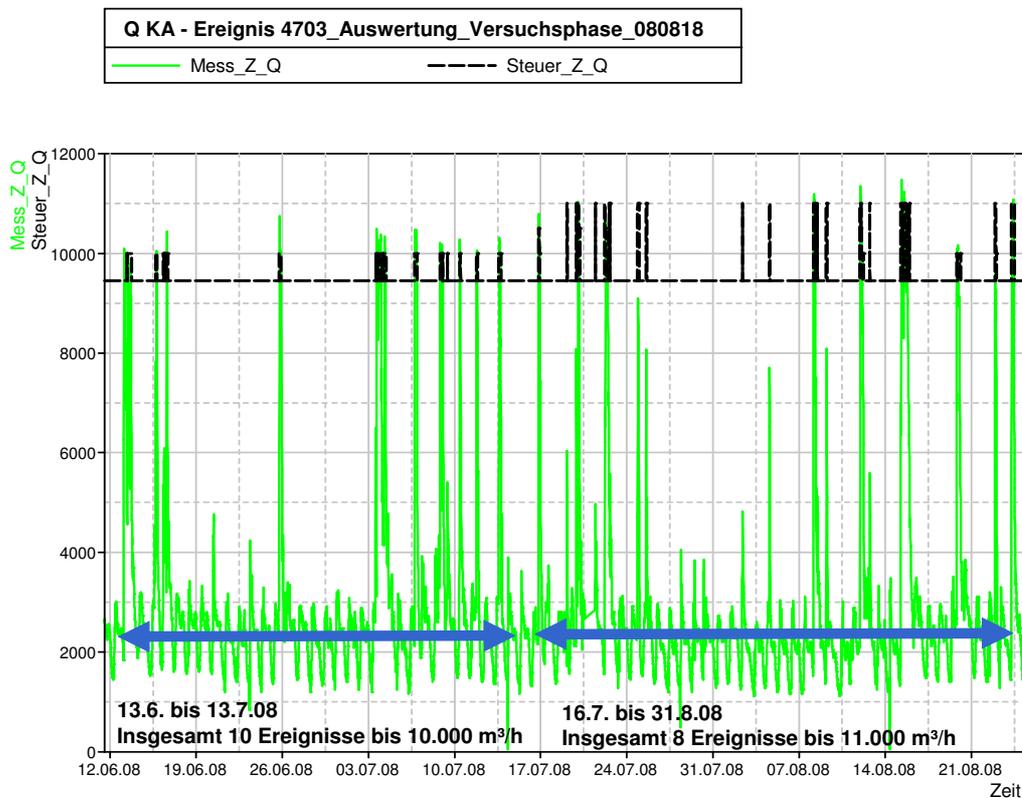


Bild 6.4 Übersicht über die Versuchsphase: Mitte Juni bis Ende August

Im Verlauf der Versuchsphase wurde das Regelungskonzept angepasst. Im Einzelnen wurden die in Tab. 6.1 dargestellten Änderungen durchgeführt.

Tab. 6.1 Wesentliche Änderungen am Regelungskonzept während des Versuchsphase

Versionsnummer	Datum Aktivierung	Änderung
Chemnitz_V29.xml	20.5.08 8:20 Uhr	Erweiterung der Bereichsgrenze RW_Nges_AN „niedrig“ 0-11 statt 10-11. Wurde zuvor in CONTROL fehlerhaft verarbeitet.
Chemnitz_V30.xml	21.5.08 12:26 Uhr	Regeln 3x und 41 ergänzt um Bedingung, dass sie nur bei MW-Zuflüssen aktiv werden.
Chemnitz_V31.xml	10.6.08 8:20 Uhr	Verschiedene kleine Korrekturen
Chemnitz_V32.xml	7.7.08 8:15 Uhr	Änderung Bereichsgrenzen P_{ges} (neu wie in Tab. 5.5), um Q_z früher zu reduzieren
Chemnitz_V33.xml	15.7.08 13:20 Uhr	Sollwert Q_z nun bis auf 11.000 m ³ /h PO_4 - P_{BB} in Bedingungen eingefügt (0-1)

6.3.2 Auswertung der Mischwasserereignisse mit Reglereingriff

Die 18 Regenereignisse, in denen eine Regelung des Zuflusses erfolgte, sind in Tab. 6.2 zusammengestellt. In Spalte 2 und 3 ist die jeweilige Dauer des Zuflusses zur Kläranlage über 10.000 bzw. 11.000 m³/h in Stunden angegeben. Bei Regenereignis 16 ist die Kläranlage z.B. für fast 8 Stunden mit über 10.000 m³/h bzw. davon ca. 2 Stunden mit mehr als 11.000 m³/h beschickt worden.

Tab. 6.2 Zusammenstellung der Ereignisse mit Reglereingriff

Ereignis	10.000 m ³ /h?	11.000 m ³ /h?	Reduzierung KÜ [m ³]	Probleme KA, Sonstiges	Funktion Regler
1	0,5 h	Nein	730	P _{ges,AN} , NO ₃ -N _{AN} bei TW, wenig Q	4 Regeln erfüllt, Q _Z z.T. am Anfang nicht Maximal
2 + 3	1,25 h	Nein	1.140, kein KÜ	P _{ges,AN} , NO ₃ -N _{AN} , Trübung (Messfehler), wenig Q	9 Regeln erfüllt, Q _Z in Ereignismitte nicht max.
4	2,5 h	(Ja, 1,25 h) ¹⁾	1.755	Nach Nachlassen Q: P _{ges,AN} , NO ₃ -N _{AN}	4 Regeln erfüllt, Q _Z am Ende nicht max.
5	5 h	(Ja, 3 h) ¹⁾	4.326	P _{ges} (Überschreitung Grenzwert)	4 Regeln erfüllt (04,14,34,41), Q _Z in Ereignismitte nicht max.
6	3,25 h	(Ja, 3 h) ¹⁾	2.478	Nach Nachlassen Q: P _{ges,AN} , NO ₃ -N _{AN}	4 Regeln erfüllt, Q _Z am Ende nicht max.
7	1,0 h	(Ja, 1 h) ¹⁾	1.041	P _{ges,AN}	3 Regeln erfüllt, Q _Z in Ereignismitte nicht max.
8	1,0 h	(Ja, 1 h) ¹⁾	930	Keine Probleme, kein KÜ	Nur Regel 41
9	0,5 h	(Ja, 0,5 h) ¹⁾	658	Keine Probleme, kein KÜ	Nur Regel 41
10	1,3 h	(Ja, 1,3 h) ¹⁾	300	Keine Probleme, kein KÜ	Nur Regel 41
11	2,3 h	(Ja, aber zu wenig Q) ²⁾	2.197	P _{ges,AN} nach Ende sehr hoch	6 Regeln, Q _Z am Ende nicht max.; P _{ges,AN,max} nicht zu verhindern
12	2,0 h	Ja, 2 h	2.420	keine	Nur Regel 41 aktiv
13	1,0 h	(Ja, aber zu wenig Q) ²⁾	1.038	P _{ges} , Schlamm Spiegel relativ hoch (1,9 m)	4 Regeln erfüllt, Q _Z in Ereignismitte nicht max
14	2,8 h	Ja, 2,5 h	4.264	TS _{BB} kurzfristig zu niedrig	Regel 41, Reduzierung wg niedrigem TS _{BB}
15	2,5 h	Ja, 1,5 h	3.414	P _{ges} (Überschreitung GW) wg. fehlerhafter Werte MC4, NH ₄ -N bis 3,5 mg/L	7 Regeln, P _{ges,AN,max} nicht zu verhindern, obwohl 1 h vorher Q _{Z,9450}
16	7,75 h	Ja, 2 h	11.302	P _{ges} zwischendurch leicht erhöht, TS _{BB} min	2 Regeln erfüllt, Q _Z zwischendurch nicht max
17	1,0 h	Nein	784	N _{ges} vor Beginn bei TW hoch, später P _{ges}	7 Regeln erfüllt, Q _Z nicht max
18	1,75 h	Ja, 1 h	800, kein KÜ	Keine	Nur Regel 41 aktiv

¹⁾ Empfehlung Regler; in der Projektphase noch nicht umgesetzt!

²⁾ Empfehlung Q_Z = 11.000 m³/h, aber vorhandener Zufluss zu gering

Bericht DBU-Projekt Phase 2

Weiterhin wird deutlich, dass bei vielen Ereignissen das Überlaufvolumen aus dem RÜB reduziert werden kann. In der Untersuchungsperiode betrug die maximale Reduktion 11.300 m^3 (Ermittlung durch Bilanzierung, s. Kap. 6.3.3). In der letzten Spalte ist die Funktionsweise des Reglers bzw. dessen Reaktion auf die Probleme der Kläranlage beschrieben.

Es wird deutlich, dass regelmäßig Probleme mit dem P_{ges} Ablaufwert auftraten (bei 6 Ereignissen Wert \geq „hoch“). Trotz frühzeitiger Reduzierung des Zuflusses auf den IST-Wert war in 2 Fällen eine Grenzwertüberschreitung (bis $P_{\text{ges,AN}}$ $1,3 \text{ mg/L}$, $>$ „hoch“) nicht zu verhindern. Dieses Problem wird in einem nachfolgenden Beispiel diskutiert und die Ursachen gezeigt.

Die sonstige Funktionsweise des Reglers war plausibel und Zuflusserhöhungen bis $11.000 \text{ m}^3/\text{h}$ konnten ohne weitere Störungen des Prozesses durchgeführt werden, wie die nachfolgende Auswertung der Messdaten aus den 18 Ereignissen zeigt:

- **Betriebsgrößen** (O_2 , VSV, ISV) im „normalen“ Bereich; TS_{BB} 2 x kurz $< 2,5 \text{ g/L}$
- **$\text{NH}_4\text{-N}_{\text{BB}}$** $< 2,8 \text{ mg/L}$ (häufig Ausfall des Messgerätes)
- **Schlamm Spiegel** $< 2,1 \text{ m}$ („niedrig“ bzw. „mittel“)
- **$\text{NH}_4\text{-N}_{\text{AN}}$** $< 1,2 \text{ mg/L}$ (=„niedrig“), [1 Ereignis: $3,5 \text{ mg/L}$]
- **CSB_{AN}** $< 47 \text{ mg/L}$ (=„niedrig“)
- **Trübung_{AN}** $< 10 \text{ TE/F}$ (=„niedrig“)
- **$\text{N}_{\text{gel,AN}}$** $< 13 \text{ mg/L}$ (=„mittel“)

Nachfolgend werden 3 ausgewählte Ereignisse und die Wirkungsweise der Regelung anhand von Ganglinien erläutert.

Ereignis 16, langes Ereignis

In Bild 6.5 ist beispielhaft ein sehr langes Ereignis mit Reglereingriff dargestellt (Ereignis 16). Nach Anstieg des Zuflusses wird der vom Regler vorgeschlagene Sollwert von $11.000 \text{ m}^3/\text{h}$ erreicht. Alle Störgrößen sind in unkritischen Bereichen, so dass die Regel 41 (vgl. Regelmatrix) zu 100% erfüllt ist. Der Anstieg des P_{ges} im Ablauf der Nachklärung auf den Wert „mittel“ führt zu einer Ablösung durch Regel 34, die eine sofortige Reduktion des Zuflusses auf $10.000 \text{ m}^3/\text{h}$ zur Folge hat (Anmerkung: Bereichsgrenzen P_{ges} : „niedrig“ grüne Linie, „mittel“ schwarz, „hoch“ rote gestrichelte Linie).

Bericht DBU-Projekt Phase 2

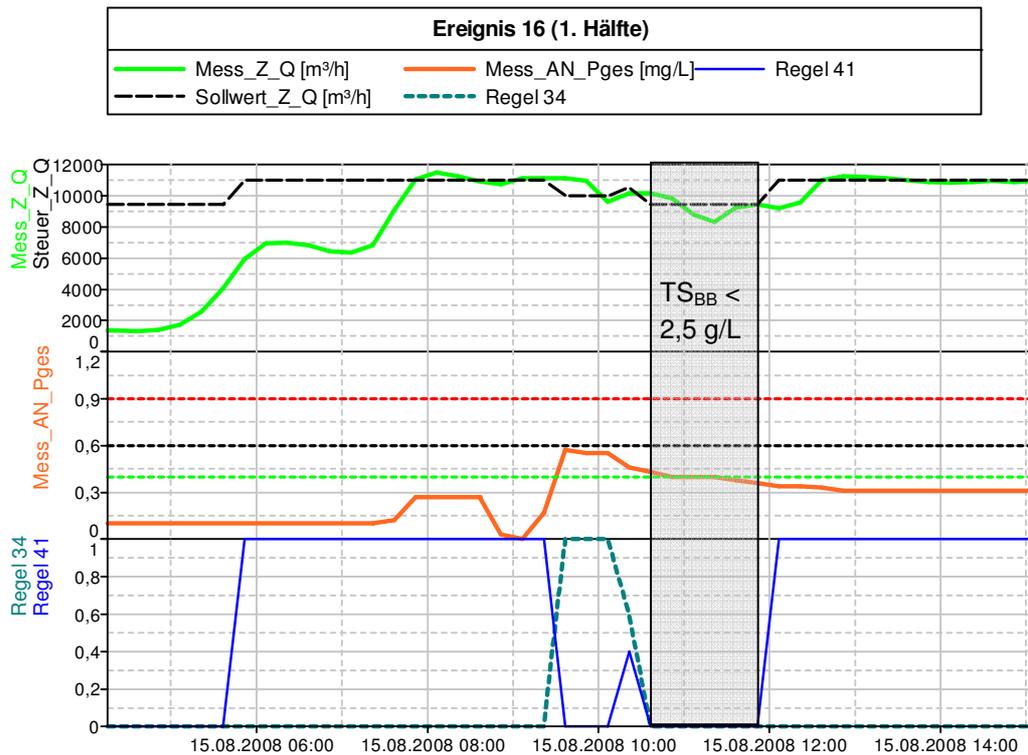


Bild 6.5 Ereignis 16 (15.8.08) mit Reglereingriff (1. Hälfte)

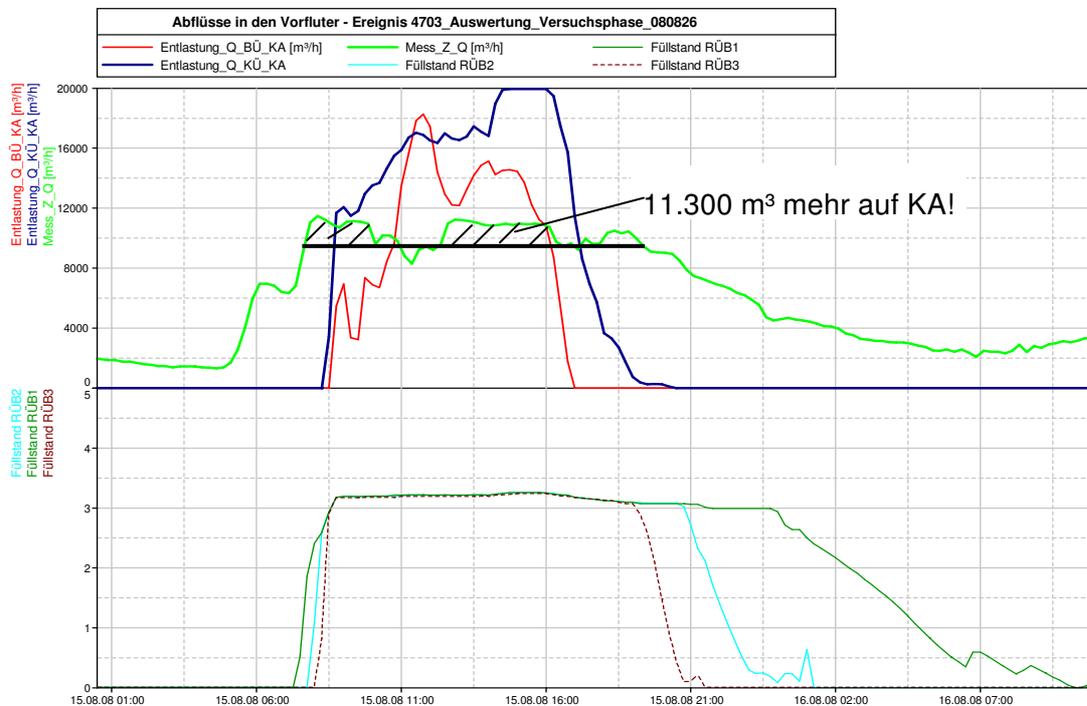


Bild 6.6 Ereignis 16, Abflüsse und Situation am RÜB

Bericht DBU-Projekt Phase 2

Nach dem Absinken des P_{ges} steigt der Zufluss leicht an, bevor der Zufluss infolge niedrigen TS-Gehalts in der Belebung auf den normalen Wert von $9.450 \text{ m}^3/\text{h}$ reduziert wird. Nachdem der TS-Gehalt durch die Schlammrückführung ausgeglichen wurde, konnte der Zufluss wieder auf $11.000 \text{ m}^3/\text{h}$ erhöht werden.

Bild 6.6 zeigt die Abflüsse und die Situation über die gesamte Ereignisdauer. Aufgrund der vollgefüllten Regenüberlaufbecken und der großen Zuflüsse aus dem Kanalnetz kommt es zu hohen Entlastungen ins Gewässer, die den Zufluss zur Kläranlage in der Summe um ein mehrfaches übersteigen. Die Erhöhung des Zuflusses zur Kläranlage auf den Maximalwert von $11.000 \text{ m}^3/\text{h}$ statt $9.450 \text{ m}^3/\text{h}$ führt zu einer Reduzierung des Entlasteten Volumens um ca. 11.300 m^3 , d.h. dieses Volumen wird durch die Maßnahme nun vor der Einleitung in die Chemnitz auf der Kläranlage gereinigt.

In Bild 6.7 sind die verfügbaren Konzentrationsmessungen im Zulauf zur Belebung ($\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$, CSB) sowie aus der Mischprobe des Klärüberlaufs bzw. aus der Stichprobe des Beckenüberlaufs dargestellt. Es wird deutlich, dass im Ereignisverlauf eine starke Verdünnung der Konzentration im Zulauf der Belebung auftritt. Eine Frachtreduktion ins Gewässer ist durch die Höherbelastung der Kläranlage nur möglich, wenn die Konzentration in der Entlastung bzw. im Zulauf nicht geringer ist als die Konzentrationen im Ablauf der Kläranlage! Langfristig sollte der Regler um diese Aspekte ergänzt werden.

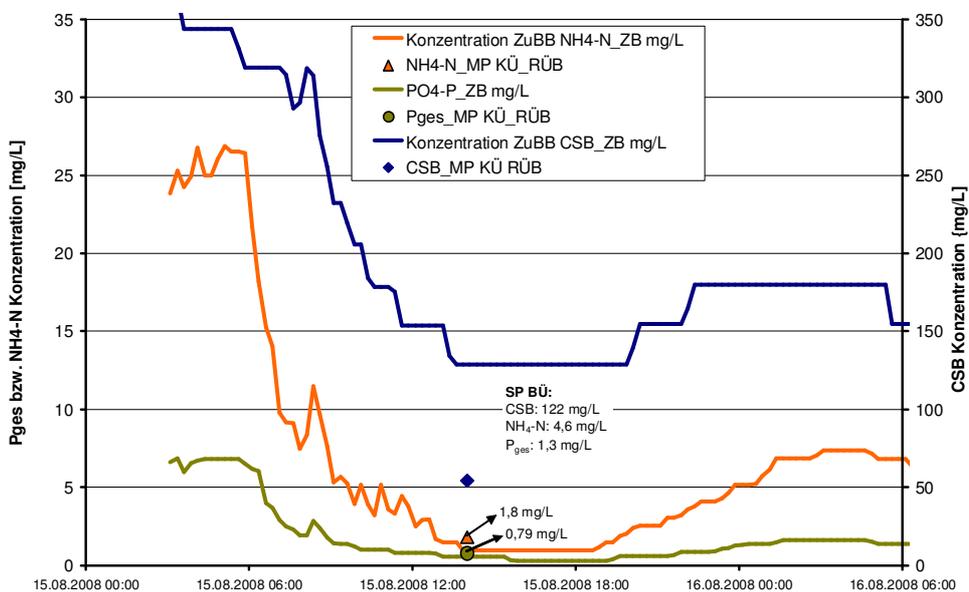


Bild 6.7

Ereignis 16, Verhalten der Konzentrationen im Zulauf

Ereignis 17, Erhöhte P_{ges} -Konzentrationen im Ablauf der Nachklärung

Die großtechnische Versuchsphase wurde im Wesentlichen bei Regenereignissen von der Problematik der erhöhten P_{ges} -Konzentrationen im Ablauf der Nachklärung begleitet. Eine aufwändige Datenauswertung und ein Ereignis mit nur einer geringfügigen Erhöhung des Zuflusses bestätigten, dass die Probleme unabhängig von den Zufluss-erhöhungen und dem Regelungskonzept des DBU-Projektes verursacht wurden.

Bild 6.8 zeigt ein Regenereignis, bei dem die P_{ges} -Konzentration im Ablauf der Nachklärung auf 1 mg/L angestiegen ist, obwohl der Zufluss zur Kläranlage nur kurzfristig auf 10.000 m³/h und das behandelte Wasservolumen insgesamt nur um 780 m³ erhöht wurde. Die zusätzliche P-Fracht über das Ereignis betrug dabei 3,4 kg, was einer Erhöhung um ca. 3% entspricht. Die Zuflussreduzierung zu Beginn erfolgte vom Regler zunächst als Folge von leicht erhöhten Stickstoffablaufwerten bei Trockenwetter. Erst im Verlauf des Ereignisses wurden die Regeln 04 und 14 zur Reduzierung des Zuflusses infolge erhöhter $P_{ges,AN}$ -Konzentrationen erfüllt. Die Zuflussreduzierung ist nicht ausreichend bzw. zu spät, um die erhöhten P_{ges} -Werte zu verhindern.

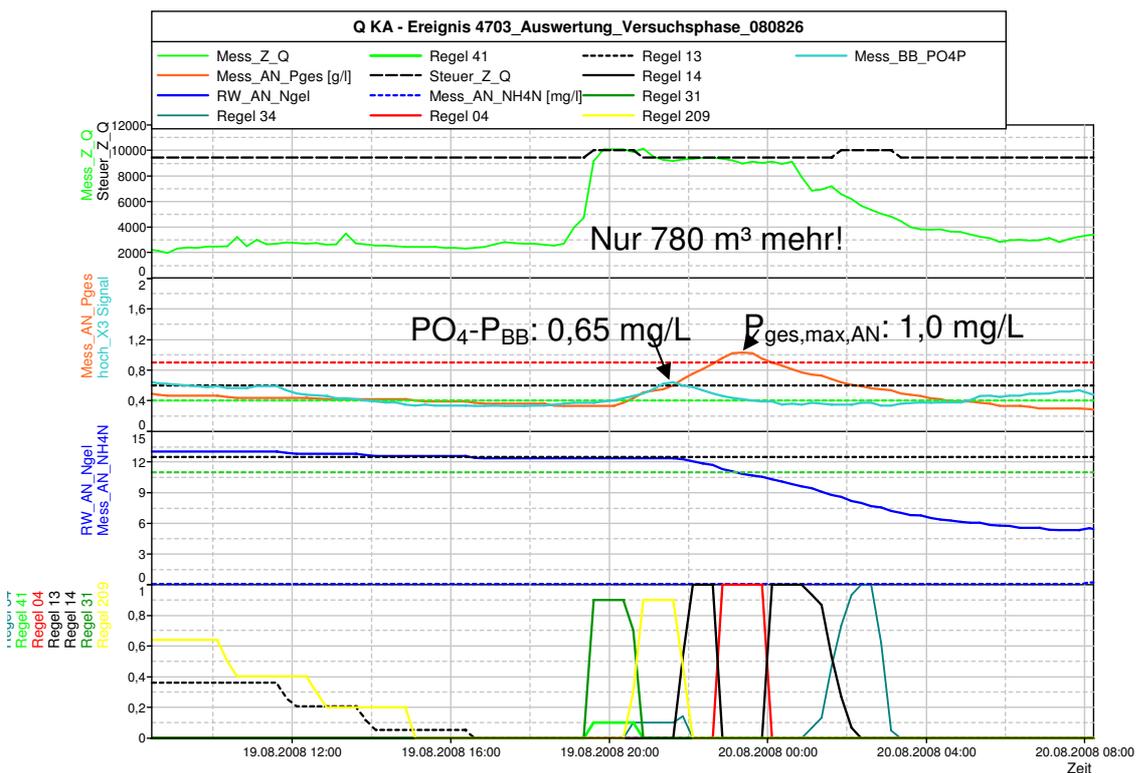


Bild 6.8 Ereignis 17 mit Reglereingriff, 19.8.08

Der partikuläre P-Anteil im Ablauf der Nachklärung beträgt ca. 0,4 mg/L, er ist damit gegenüber Trockenwetterbedingungen (ca. 0,1 bis 0,2 mg/L) infolge der gesteigerten Belastung durch das Mischwasserereignis leicht erhöht, liegt aber im üblichen Bereich

Bericht DBU-Projekt Phase 2

und ist nicht als Versagen der Nachklärung zu bewerten. Die Konzentration des gelösten $\text{PO}_4\text{-P}$, der nach der chemischen Fällung in die Nachklärung gelangt, beträgt 0,65 mg/L.

Eine gut funktionierende Fällung sollte ein Ansteigen des gelösten $\text{PO}_4\text{-P}$ auf solche Werte verhindern. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass die Ursache für die erhöhten $\text{PO}_4\text{-P}$ -Werte im Anlauf der Nachklärung in der ungenügenden Fällung zu suchen ist.

Bild 6.9 zeigt die die $\text{PO}_4\text{-P}$ -Fracht im Zulauf der Nachklärung (nach Fällung) sowie die Dosierung des Fällmittels, die manuell an die Konzentration des $\text{PO}_4\text{-P}$ im Zulauf der Nachklärung angepasst wird. Aufgrund der Zuflusserhöhung ist die für die Fällung maßgebende $\text{PO}_4\text{-P}$ -Fracht bereits vervierfacht, bevor die gemessene Konzentration und als Folge die Fällmitteldosierung zunächst nur leicht erhöht werden.

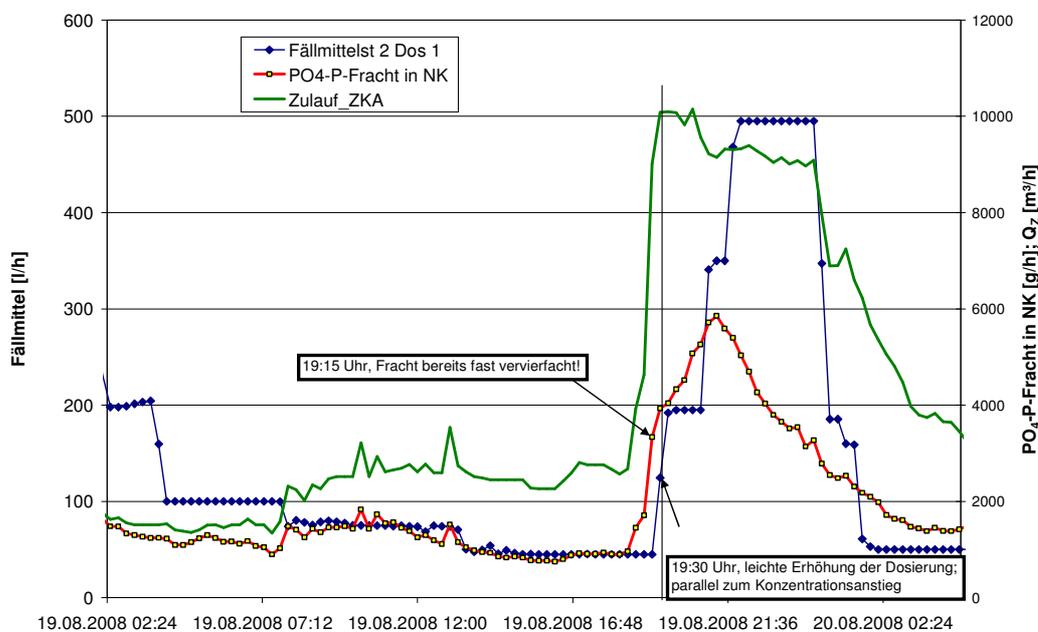


Bild 6.9 $\text{PO}_4\text{-P}$ - Frachten und Fällmitteldosierung (Ereignis 17)

Die sich derzeit im Umbau befindliche Fällmittelstation in Chemnitz wird in naher Zukunft mittels einer automatisierten, frachtbasierten Fällmitteldosierung die Phosphor-Probleme lösen können.

Weiterhin wird empfohlen, den Messwert $\text{PO}_4\text{-P}_{\text{Z_NK}}$ sowie die Probenstromaufbereitung zu überprüfen. Bild 6.9 zeigt, dass deutliche Änderungen am Fällmittelstrom kaum am $\text{PO}_4\text{-P}_{\text{Z_NK}}$ erkennbar sind. Eventuell kann ein zu geringer Probenstrom dazu führen, dass am Messgerät nicht der aktuelle Wert sondern ein "gleitendes Mittel" angezeigt wird, was eine zu träge Reaktion der Dosierung zur Folge hat.

Ereignis 18, schwaches Regenereignis

Bild 6.10 zeigt ein schwächeres Regenereignis vom 24.8.2008. Der Zufluss erreicht den Maximalwert von 11.000 m³/h nur für ca. 1 Stunde. Die Ablaufmesswerte sind alle im Bereich „niedrig“, die Betriebsgrößen sind im normalen Bereich, so dass im gesamten Zeitraum, mit einer kurzen Ausnahme, nur die Regel 41 erfüllt ist und damit 11.000 m³/h zulässig wären.

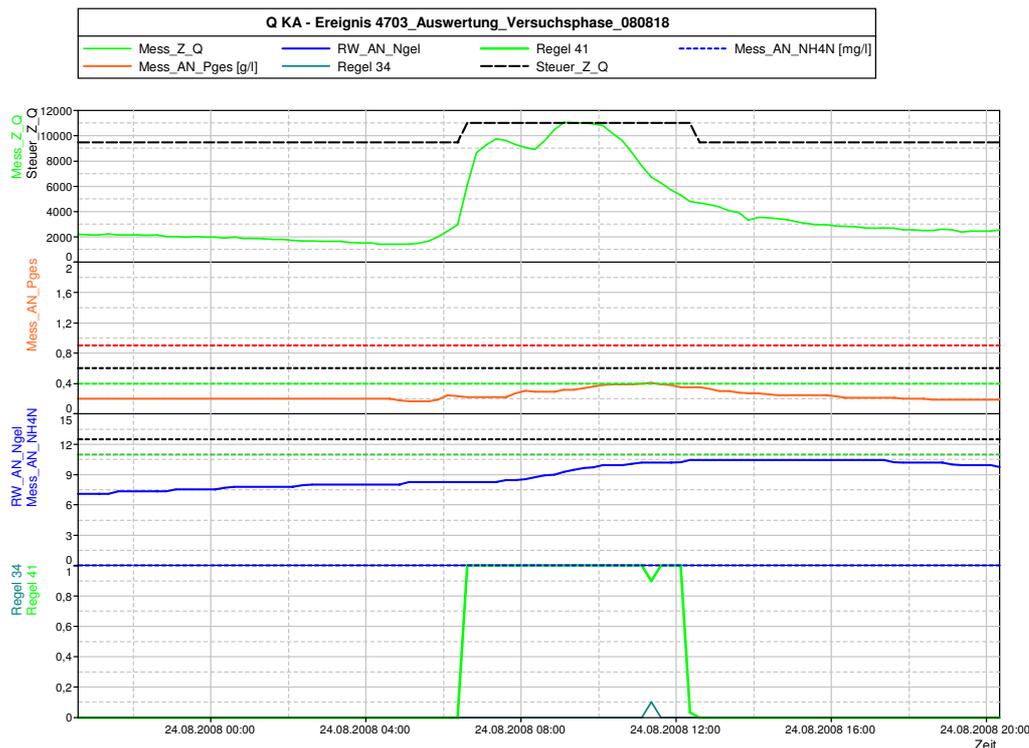


Bild 6.10 Ereignis 18 mit Reglereingriff, 24.8.08

In Bild 6.11 ist die dazugehörige Situation am Regenüberlaufbecken dargestellt. Entlastungen von Mischwasser ins Gewässer aus Klärüberlauf und Beckenüberlauf erfolgen nicht. Die Beckenkompartimente des RÜB werden im Verlauf des Ereignisses bis auf 1.500 m³ frei bleibendes Volumen gefüllt. Die Analyse zeigt, dass die Entlastung aus dem Regenüberlaufbecken nur infolge des erhöhten Zuflusses zur Kläranlage vermieden werden konnte, da dort insgesamt 2500 m³ mehr behandelt wurden. Die Auswertung des Ereignisverlaufs führte zur Erkenntnis, dass ca. 800 m³ Entlastungsvolumen verhindert werden konnten. Die Reduzierung der Gesamtemission aus Überläufen und Kläranlage ins Gewässer beträgt für dieses Ereignis ca. 23 % (vgl. Kap. 6.3.3).

Bericht DBU-Projekt Phase 2

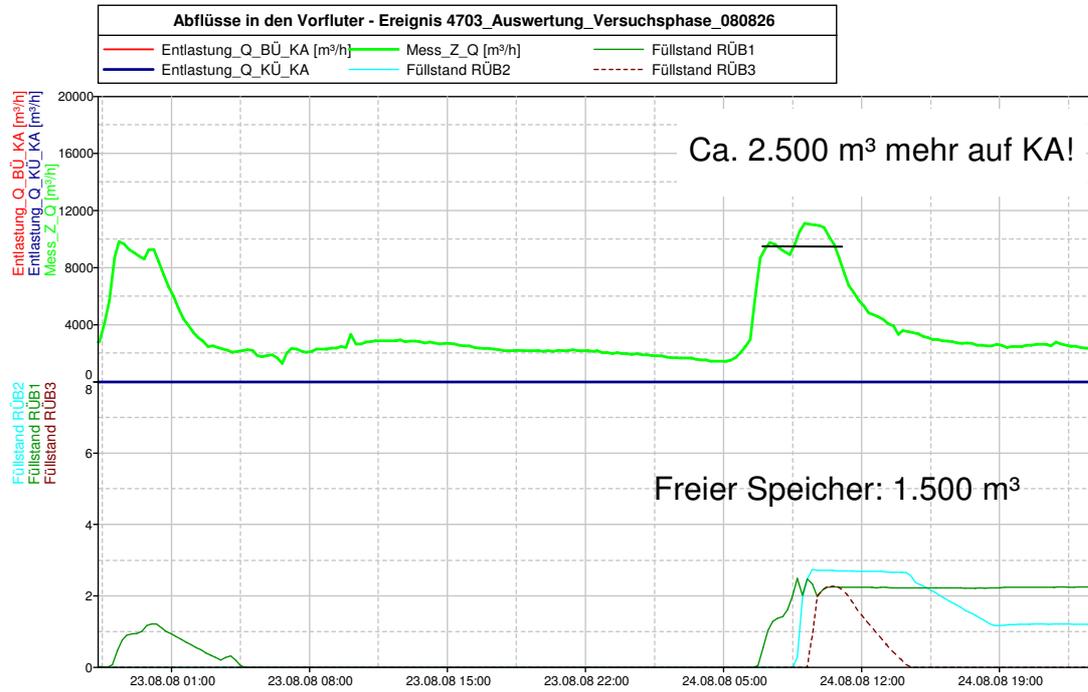


Bild 6.11 Situation am RDLB (RÜB), Ereignis 18

Bericht DBU-Projekt Phase 2

- Frachtzunahme_{AN_KA} wg. Regler = $|Q_Z - 9.450 \text{ m}^3/\text{h}| \cdot C_{AN}$

Ohne Regelung (max. 9.450m³/h) ergeben sich die Frachten theoretisch zu:

- Fracht_{Z_KA} (ohne Regler) = $Q_Z \cdot C_{ZB} - |Q_Z - 9.450 \text{ m}^3/\text{h}| \cdot C_{KÜ}$
- Fracht_{AN_KA} = $Q_{AN} \cdot C_{AN} + |Q_Z - 9.450 \text{ m}^3/\text{h}| \cdot C_{AN}$
- Fracht_{aus RÜB} = $(Q_{KÜ} + Q_{BÜ}) \cdot C_{KÜ} + |Q_Z - 9.450 \text{ m}^3/\text{h}| \cdot C_{KÜ}$

Die getroffenen Annahmen führen in den beiden folgenden Punkten zu einer Unterschätzung der tatsächlichen Frachtreduktion:

- Die Konzentration der Mischprobe im Klärüberlauf ist deutlich niedriger als die zu Beginn des Ereignisses aufgetretene Konzentration in der Entlastung im Beckenüberlauf.
- Für P_{ges} und CSB ist die Frachtzunahme zur KA sicherlich höher als die Frachtreduktion des Klärüberlaufs, da im RÜB eine Absetzwirkung vorhanden ist.

Demgegenüber führt die Annahme, dass die Konzentrationen im Kläranlagenablauf bei geringeren Zuflüssen gleich groß sind wie bei den gesteigerten, zu einer leichten Überschätzung der Frachtreduktion. Insgesamt dominiert aber die Unterschätzung, d.h. die tatsächlichen Reduktionen der Gesamtemission sind eher größer als durch die Bilanzierung ausgewiesen.

Bild 6.13 und Bild 6.14 zeigen exemplarisch für NH₄-N die Frachten der 18 Mischwasserereignisse. Für jedes Ereignis wurden die Frachten aus dem Ablauf der Kläranlage sowie aus dem Regenüberlaufbecken (als Summe Beckenüberlauf und Klärüberlauf) dargestellt. Die beiden Lastfälle „mit Regler“ (Q_Z bis max. 11.000 m³/h) und „ohne Regler“ (IST-Zustand mit Q_Z bis 9450 m³/h) sind gegenübergestellt.

Die Reduzierung der Fracht wird durch die angegebenen Prozentzahlen ausgedrückt. Während bei sehr großen, lang anhaltenden Ereignissen die Frachtreduktion im Bereich von ca. 5% liegt, kann bei schwächeren Ereignissen mit der integrierten Steuerung ein Überlaufen des Beckens vermieden werden, so dass im Untersuchungszeitraum Reduzierungen von bis zu 23% erzielt wurden.

Bericht DBU-Projekt Phase 2

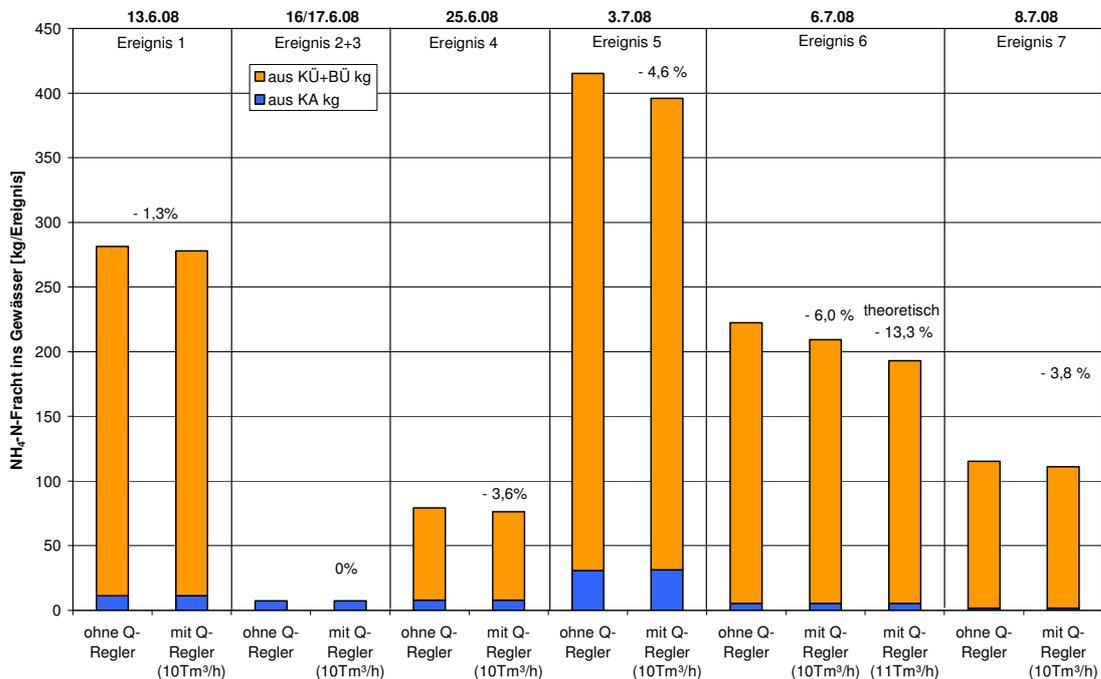


Bild 6.13 NH₄-N-Frachtbilanz (Ereignisse 1-7)

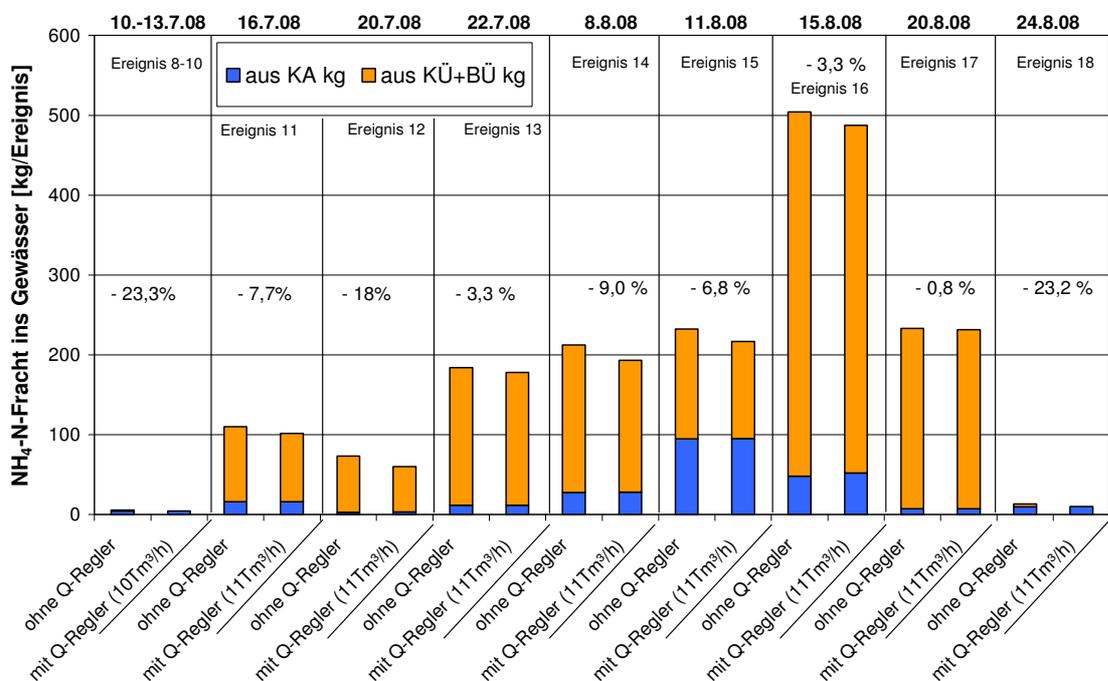


Bild 6.14 NH₄-N-Frachtbilanz (Ereignisse 9-18)

Bericht DBU-Projekt Phase 2

Insgesamt wurden durch die Steuerung des Zuflusses zur Kläranlage von Mitte Juni bis Ende August 2008 2.800 kg CSB, 130 kg NH₄-N und 35 kg P_{ges} weniger ins Gewässer eingetragen (Bild 6.15).

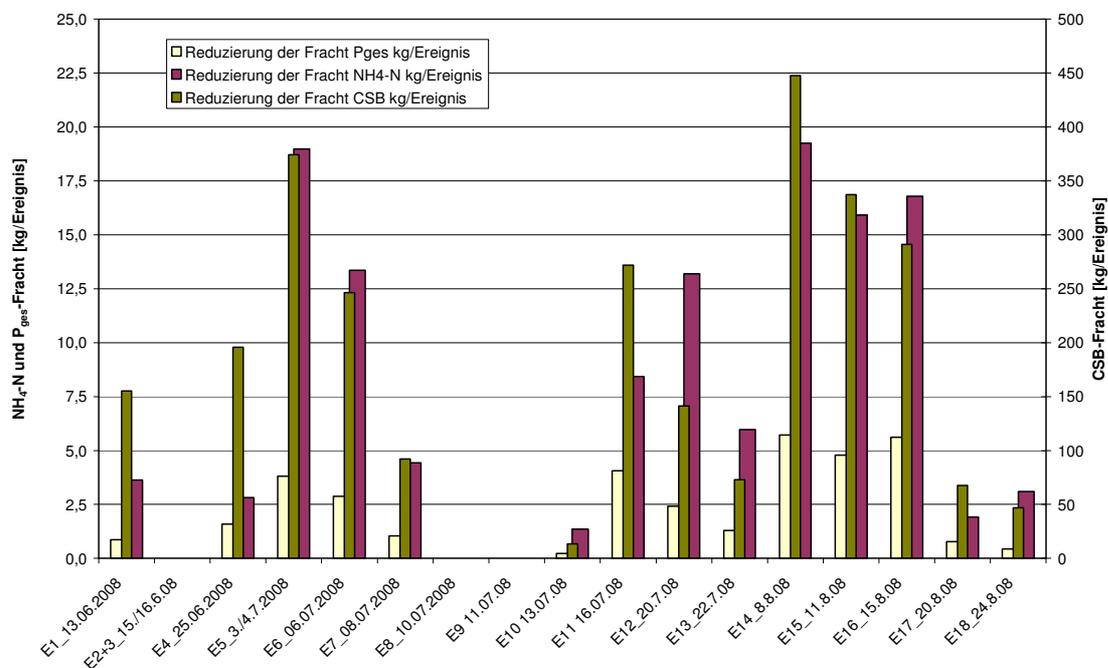


Bild 6.15 Reduzierung der Frachten bei den Ereignissen im Versuchszeitraum

6.4 Sonstige praktische Aspekte

Entstehen zusätzliche Kosten durch die Maßnahmen?

Die zusätzliche Fracht infolge der Erhöhung des Zuflusses bzw. der Mehrbehandlung in der Kläranlage steigert die Betriebskosten in folgenden Positionen:

- Schlammanfall
- Energiekosten (Belüftung, Pumpen)
- Fällmittel

Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass die zusätzliche Fracht ebenfalls auf die Kläranlage gelangen würde, wenn zusätzliches Speichervolumen im Kanalnetz zur Misch-

Bericht DBU-Projekt Phase 2

wasserbehandlung realisiert würde. Das gespeicherte Mischwasser würde nach der Entleerung ebenfalls zur KA geleitet.

Hinsichtlich der zusätzlichen Kosten durch Fällmittel wurde eine überschlägige Kostenanalyse für den Versuchszeitraum durchgeführt:

- insgesamt wurden ca. 40.000 m³ Mischwasser mehr behandelt: der Mittelwert des PO₄-P_{ZB} über die gesamte Versuchsperiode von Mitte Juni bis Ende August betrug 4,1 mg/L. Daraus ergibt sich eine zusätzliche Fracht von ca. 164 kg PO₄-P
- Für diese zusätzliche Fracht sind 2,37 m³ Fällmittel erforderlich (Annahme: kein BioP) bzw. 3,6 t
- Bei spezifischen Kosten von 115 € /Tonne ergeben sich Mehrkosten von ca. **415 €** für den Gesamtzeitraum der Versuche!

Diese Mehrkosten sind im Vergleich zum Nutzen unerheblich.

Möglichkeiten zur Einbindung in Schmutzfrachtnachweis

Wie die großtechnischen Untersuchungen gezeigt haben, führt die Höherbelastung zu einem Spannungsfeld zwischen niedrigen Emissionen und limitierenden Bedingungen in der Abwasserbehandlung, so dass die Erhöhung nicht über das gesamte Jahr vorgesehen werden kann. Insbesondere im Hinblick auf eine für manche Einzugsgebiete interessante Kosten-Einsparung durch nicht benötigte Beckenvolumina infolge erhöhter Zuflüsse zur Kläranlage steht dies im Gegensatz zu den heute üblichen statischen Bemessungsansätzen.

Es wird daher vorgeschlagen, einen hydrodynamischen Schmutzfrachtnachweis mit einem integrierten Modell von Kanalnetz und Kläranlage über ein repräsentatives Jahr durchzuführen. Dieses Vorgehen wurde bereits, nur mit dem hydrodynamischen Schmutzfrachtmodell des Kanalnetzes, für den Nachweis der Einhaltung der Entlastungsfrachten mittels Kanalnetzsteuerung (z.B. in Dresden und Bamberg) angewendet. Somit kann die zulässige Jahresentlastungsfracht durch eine wesentliche Reduktion im Sommerhalbjahr erzielt werden, auch wenn im Winterhalbjahr die Reduktion deutlich geringer ausfällt.

Allgemein kann parallel auch ein Steuerungspotential im Kanalnetz ausgeschöpft werden, um eventuell zu bauendes Speichervolumen einzusparen.

7 Übertragbarkeit auf andere Gebiete

7.1 Allgemeine Hinweise

Die in Chemnitz in großtechnischen Versuchen erzielten Ergebnisse mit Reduzierungen der Frachten ins Gewässer sind auch in anderen Einzugsgebieten zu erwarten, wie Simulationsstudien aus der Literatur belegen. Eine Quantifizierung des Potentials ist allerdings nur durch eine Untersuchung am jeweiligen Gebiet unter Berücksichtigung der zahlreichen Randbedingungen möglich.

Die dynamische Bewirtschaftung des Zuflusses zur Kläranlage bedingt eine ständige Kontrolle der kritischen Reinigungsprozesse, um erhöhte Konzentrationen im Ablauf der Kläranlage zu vermeiden und die Betriebssicherheit nicht zu gefährden. Idealerweise muss dabei das Anlagenverhalten vorausschauend bewertet werden, da aufgrund der langen Verweilzeit eine ausschließlich reaktive Regelung zu träge wäre und die Gefahr bestehen würde, die Anlage zu überlasten.

Aufgrund dieser anspruchsvollen Anforderungen an eine Regelung ist eine direkte Übertragbarkeit eines gesamten Konzepts auf andere Kläranlagen nicht möglich. Jedes Einzugsgebiet, jedes Entwässerungssystem und jede Kläranlage hat individuelle Charakteristika, die jeweils in einer eigenen detaillierten Untersuchung identifiziert werden müssen und aus denen systembezogene Störgrößen, deren Größenordnung und Randbedingungen abzuleiten sind. Auch ist eine allgemeingültige Definition von Mindestanforderungen hinsichtlich der Mess- und Regelungstechnik nicht möglich. Grundsätzlich muss folgendes gewährleistet sein:

- Durchflussmessung im Zulauf zur Kläranlage sowie gegebenenfalls im Kanalnetz (bei zusätzlicher Verbundsteuerung)
- Steuerung des Zuflusses in die Kläranlage bzw. an Bauwerken im Kanalnetz mittels Pumpen bzw. Schieber
- Mischwasserentlastungsbauwerk in unmittelbarer Nähe des Kläranlagenzuflusses
- Online-Messung von CSB, $\text{NH}_4\text{-N}$, P_{ges} und $\text{NO}_3\text{-N}$ in der Kläranlage im Hinblick auf die gesetzlichen Grenzwerte sowie von zusätzlichen Größen je nach Schwachstellenanalyse

Die im Rahmen des Forschungsprojekts erarbeitete Herangehensweise mit Umsetzungshinweisen kann als Konzept auf andere Gebiete übertragen werden, um eine dynamische Bewirtschaftung des Mischwasserzuflusses zu entwickeln.

Bericht DBU-Projekt Phase 2

7.2 Erforderliche Arbeitsschritte

Das Arbeitskonzept für die Entwicklung einer integrierten Bewirtschaftung ist in Bild 7.1 dargestellt. Eine gut durchgeführte Bearbeitung ist aufwändig, kann allerdings im Anschluss mit in der Regel sehr geringen Investitionskosten zu effizienten Verbesserungen des Systems Kanalnetz und Kläranlage führen.

Die Bearbeitungsschritte bestehen zunächst aus Voruntersuchungen, in denen vor einer weiteren Umsetzung wichtige Fragestellungen zu klären sind.

Die Möglichkeiten der integrierten Bewirtschaftung sind von der vorliegenden Anlagenkonfiguration und dem jeweiligen Einzugsgebiet abhängig, so dass zuerst eine Datenauswertung erfolgen muss, die freie Kapazitäten und gegebenenfalls limitierende Prozesse aufzeigt (**Schritt 1**).

Wesentliche Voraussetzung für eine optimierte Mischwasserbelastung der Kläranlage ist die Beachtung und Einhaltung technologischer und technischer Grenzen, d.h. bau- und maschinentechnischer Limitierungen für eine hydraulische und stoffliche Höherbelastung (vgl. Kap. 4.2). Limitierungen, die sich aus der aktuellen Kläranlagenleistungsfähigkeit ergeben, müssen anhand detaillierter Datenauswertungen zum Verhalten der jeweiligen Reinigungsprozesse ermittelt werden (vgl. Kap. 4.3 bis 4.5). Gegebenenfalls können diese Untersuchungen auch Potentiale zur Schaffung freier Kapazitäten aufzeigen.

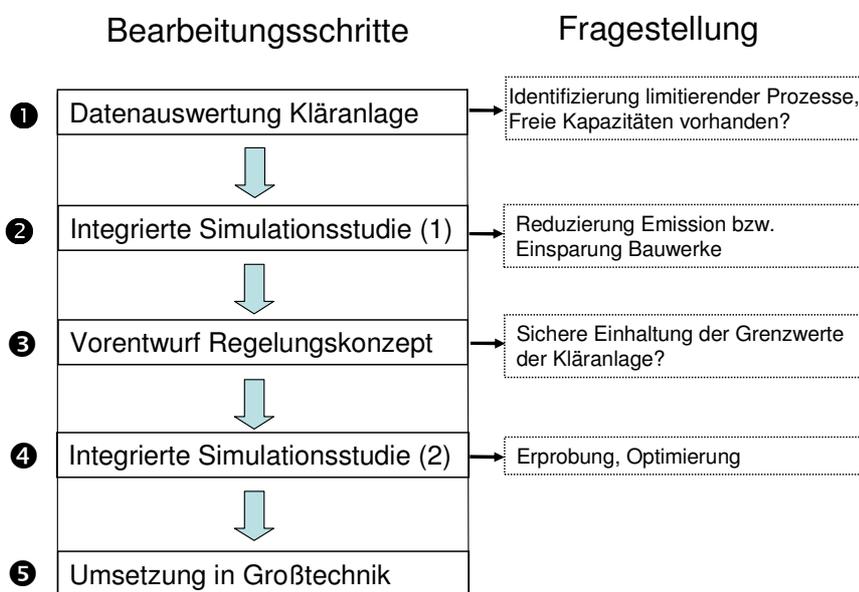


Bild 7.1 Erforderliches Bearbeitungskonzept

Mittels einer integrierten Simulationsstudie (**Schritt 2**, vgl. Kap. 3.4) anhand realer Re-

Bericht DBU-Projekt Phase 2

genereignisse mit einem kalibrierten Modell (vgl. Kap. 3.1, 3.2 und 3.3) kann der potentielle Nutzen ermittelt werden: Ist eine Reduzierung der Emission oder eine Einsparung von geplantem Beckenvolumen erforderlich bzw. möglich? Heute verfügbare Modelle sind, nach detaillierter Kalibrierung und Verifizierung an Messdaten, hierfür gute Werkzeuge und wurden bereits vielfach für integrierte Betrachtungen eingesetzt (Rauch et al., 2002; Erbe et al., 2002).

In **Schritt 3** ist mit geeigneter Software ein Regelungskonzept zu entwerfen, das die einführend genannten Anforderungen an die Betriebssicherheit der Kläranlage erfüllen kann (z.B. mittels Fuzzy-Logik-Ansatz). Durch die Überführung der Erkenntnisse aus der Datenauswertung in sinnvolle Störgrößen und deren Einbindung in das Regelungskonzept wurden diese dynamischen Belastungsgrenzen berücksichtigt. In Kap. 5.2 werden potentielle Störgrößen, die üblicherweise auf Kläranlagen als Messdaten vorliegen, vorgestellt und diskutiert und Vorschläge zur Definition der Bereichsgrenzen gegeben. In Kap. 5.5 werden Möglichkeiten zur Einführung einer automatisierten Plausibilitätskontrolle der Messdaten aufgezeigt.

Mit dem entworfenen Regelungskonzept sollte das System mittels weiterer Simulationsstudien erprobt und optimiert werden (**Schritt 4**, vgl. 5.4).

Die großtechnische Umsetzung (**Schritt 5**) ist erneut stark geprägt von den im System verfügbaren Randbedingungen (Leitsystem, Datenbanken etc.). Die heutzutage in der Regel offenen Datenstrukturen vereinfachen eine Implementierung. Nach der Installation des Reglers vor Ort sollten die Zuflüsse in Stufen, die jeweils Risikoklassen entsprechen, langsam erhöht werden. In der Startphase ist eine parallele Überwachung des Reglers und des Anlagenverhaltens erforderlich.

8 Zusammenfassung

Die Zielsetzung in dem von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten Forschungsprojekt war die Entwicklung eines Regelungssystems, mit dem die Gesamtemission aus Kanalnetz und Kläranlage und damit die Gewässerbelastung reduziert werden kann.

Nachdem in Projektphase 1 im Jahr 2005 (itwh, ISI, 2006) Voruntersuchungen durchgeführt wurden, erfolgte in der 2. Phase die großtechnische Umsetzung in Zusammenarbeit mit den Stadtwerken Chemnitz und der zuständigen Überwachungsbehörde. Der vorliegende Abschlussbericht fasst die Ergebnisse der Untersuchungen der 2. Projektphase zusammen.

Die maßgebende Stellgröße in dem zu entwickelnden Regelungssystem ist der maximale Mischwasserzufluss zur Kläranlage, der – unter ständiger Kontrolle der vorgegebenen Randbedingungen – dynamisch geregelt werden muss um das System Kanalnetz und Kläranlage optimal auszunutzen. Simulative Untersuchungen zeigten im Vorfeld das vorhandene Potential, das sich durch Nutzung freier Kapazitäten der Kläranlage bei Regenereignissen ergibt. Optimale Voraussetzungen für diesen Ansatz sind die standardmäßig auf vielen größeren Kläranlagen verfügbaren Online-Messungen sowie die formale Randbedingung mit einer zulässigen Bandbreite statt eines bisher festen Wertes für den maximalen Kläranlagenzuflusses durch das ATV-DVWK Arbeitsblatt A198 (2003).

Die Untersuchungen mit der großtechnischen Implementierung des entwickelten Regelungskonzeptes wurden im **Abwassersystem Chemnitz** mit einer Kläranlagenkapazität von 400.000 EW durchgeführt, dessen Systeme die folgenden günstigen Randbedingungen aufwiesen:

- Es sind zahlreiche Online-Messstellen in der Kläranlage vorhanden.
- Der Zufluss zur Kläranlage wird via Regelschütze und MIDs geregelt. Das nicht auf die Kläranlage geführte Mischwasser wird in ein Durchlaufbecken im Nebenschluss geleitet bzw. direkt im Regenüberlauf entlastet. Der Ausbau des Kanalnetzes ist noch nicht abgeschlossen.
- Die Anlage wird bei Mischwasser mit 9.450 m³/h bereits im IST-Zustand recht hoch beschickt (Bandbreite gemäß ATV-DVWK A198: 5.000 bis 8.580 m³/h).

Sowohl für das Kanalnetz (aus der GEP-Bearbeitung 1997) als auch für die Kläranlage (SIMBA, Fa. Optum Systemtechnik) lagen Modellanwendungen bei den Stadtwerken Chemnitz vor, die eine gute Grundlage für die weitere Entwicklung des **integrierten Modells** waren. Die Modelle HYSTEM-EXTRAN-GÜTE (itwh) und SIMBA (ifak, Magde-

Bericht DBU-Projekt Phase 2

burg) wurden anhand von Routine- und Sondermessungen kalibriert und mittels der Regelungssoftware itwh.CONTROL gekoppelt. Die mit dem Gesamtmodell erzielte Modellgüte ist für den Anwendungsfall integrierter Fallstudien und des Testens eines Regelungskonzepts ausreichend genau.

Vor dem Hintergrund des Reglerentwurfs wurde eine **Ermittlung der Belastungsgrenzen** und potentieller Störgrößen der KA Chemnitz durchgeführt. Die Untersuchung der bautechnischen Limitierungen zeigte, dass der Mischwasserzufluss von ca. 11.000 m³/h die Obergrenze ist, die hydraulisch aufgenommen werden kann. Die Auswertung der Messdaten eines Messzeitraums von 3 Jahren führte zu folgenden Erkenntnissen:

- Die Anlage ist im Jahresmittel eher gering belastet (hohes Schlammalter, niedrige Schlammvolumen- und Oberflächenbeschickungen) und produziert niedrige Ablaufwerte.
- Die Nitrifikation stellt keinen kritischen Prozess dar ($\text{NH}_4\text{-N}_{\text{AN}} < 5\text{mg/L}$). Der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Messwert im Ablauf der Belebung würde als Störgröße mit einem Prognosehorizont von mindestens 45 min auf Probleme hinweisen.
- Die Denitrifikationskapazität ist unter Trockenwetterbedingungen vereinzelt zu niedrig. Bevor bei Mischwasser eine Verdünnung einsetzt, kann die Überlagerung von noch hohen Nitratgehalten und einem $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalt um 3-4 mg/L zu einer Überschreitung des zulässigen Grenzwertes der Summe von „Ammonium + Nitrat + Nitrit“ (für Chemnitz 16,5 mg/L) führen. Der Nitratgehalt bei Trockenwetter kann als Störgröße fungieren, um bei Problemen eine Zuflusserhöhung zu vermeiden.
- Die Abtrennleistung der Nachklärung war bei einigen Ereignissen gestört. Dies zeigte sich an zeitgleich erhöhten Trübungswerten und P_{ges} -Konzentrationen. Hohe Schlammindizes und hohe Schlamm Spiegel sind eindeutige Zeichen und ideale Störgrößen zur Erfassung dieses Prozesses.
- Die Phosphorelimination ist im untersuchten Zeitraum häufiger problematisch gewesen. Der P_{ges} -Grenzwert von 1 mg/L wurde erreicht bzw. überschritten, da die Fällung bislang nicht frachtbasiert geregelt war und somit zu träge auf die erhöhten Frachten zu Beginn von Mischwasserereignissen reagierte.

Das zu **entwickelnde Regelungssystem** wurde in der Fuzzy-Logik basierten Software CONTROL (itwh) erstellt. Der darin enthaltene Regelinterpretierer verarbeitet Informationen über die Systemzustände aus Messdaten auf der Grundlage einer vorgegebenen Regelbasis. Als Ergebnis der Verarbeitung liefert er neue Sollwerte für definierte Regelorgane, in diesem Anwendungsfall für den Zufluss zur Kläranlage. Die Regeln wer-

Bericht DBU-Projekt Phase 2

den als WENN...DANN...- Beziehungen aufgestellt.

Übliche, in Kläranlagen erhobene Messwerte wurden im Hinblick auf die Nutzungsmöglichkeit als Störgröße im Regelungskonzept überprüft. Ideale Störgrößen haben einen Prognosehorizont vom Auftreten der Auffälligkeit bis zum erhöhten Wert im Ablauf der Kläranlage, da nur so eine gewisse Zeit mit Handlungsspielraum zur Reduzierung des Zuflusses zur Verfügung steht. Sind die Ablaufwerte erst einmal kritisch, wirkt eine Zuflusssdrosselung häufig zu spät! Viele verfügbare Messdaten können sinnvoll als Störgrößen mit und ohne Prognosehorizont in das Konzept eingebunden werden (Kap. 5.2.1).

Zusätzlich zum direkten Bezug auf Messdaten wurde die Verwendung von Vorhersagen mittels vereinfachter kinetischer Prozessmodelle hinsichtlich der Stickstoffelimination als Störgrößen geprüft. Der Vorteil würde in einem Vorhersagehorizont von mehreren Stunden bestehen, was frühzeitige Regelungseingriffe ermöglichen würde. Durch die Modellvereinfachungen ließen sich die für die zuverlässige Regelung maßgebenden Spitzen jedoch nicht zufriedenstellend voraussagen. Nach Auswertung simulativer Vorstudien wurde dieser Weg deshalb nicht weiter verfolgt. Ein interessanter Ansatz wäre hier die Vorhersage des Schlammspiegels mit einfachen Modellansätzen.

Das für Chemnitz erstellte Regelungskonzept (Kap. 5.3) besteht letztlich aus 38 Regeln, die in 5 verschiedenen Regelgruppen zusammengefasst sind. 14 gemessene Eingang- bzw. Störgrößen wirken sich dabei auf die Stellgröße – den Zufluss zur Kläranlage – aus.

Der Regler wurde vor der großtechnischen Anwendung simulativ erprobt und weiterentwickelt. Um die korrekte Wirkungsweise zu testen wurden hierfür, im Gegensatz zur Fallstudie aus Projektphase 1, außergewöhnlich starke reale Regenereignisse ausgewählt, die zu kritischen Zuständen im Reinigungsprozess geführt haben.

Über einen Zeitraum von vier Monaten fand in Chemnitz eine erfolgreiche **Erprobung des Reglers in der Großtechnischen Anlage** statt. Insgesamt waren 18 Regenereignisse zu verzeichnen, bei denen der Fuzzy-Regler eingegriffen hat. Bei 8 Ereignissen wurde zunächst ein maximaler Zufluss von 10.000 m³/h (gegenüber IST 9450 m³/h) eingestellt, bei 10 Ereignissen betrug der maximale Zufluss 11.000 m³/h. Die Funktionsweise des Reglers war plausibel und zuverlässig, so dass der Zufluss bis zu 11.000 m³/h ohne weitere Störungen des Prozesses erhöht werden konnte.

Mit Ausnahme der P_{ges}-Konzentration im Ablauf der Nachklärung waren alle anderen Störgrößen im normalen Bereich („niedrig“ bzw. „mittel“). Die chemische Fällung reagierte im Zeitraum der Versuche nicht auf die Fracht sondern auf die Konzentration, so dass die Ablaufwerte von P_{ges} vereinzelt im Bereich „hoch“ lagen.

Bericht DBU-Projekt Phase 2

Mit Hilfe einer vereinfachten Bilanz aus den Messungen wurden die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Frachten ins Gewässer ermittelt, die aus dem Ablauf der Kläranlage und aus dem Klär- und Beckenüberlauf des Regenüberlaufbeckens unmittelbar vor der Kläranlage resultieren. Bei schwächeren Ereignissen kann mit der integrierten Steuerung ein Überlaufen des Beckens vermieden werden, was zu Reduktionen der Fracht ins Gewässer von bis zu 23% geführt hat. Bezüglich der stofflichen Fließgewässerbelastung sind häufig genau diese „schwächeren“ Regenereignisse in den Sommermonaten kritisch, da hohe Konzentrationen und relativ hohe Frachten im Entlastungsabfluss bei niedrigen Abflüssen im Gewässer zu hohen Immissionen bzw. zu toxischen Zuständen führen können.

Da die KA Chemnitz bereits heute höher als nach A 198 beschickt wird (IST in Chemnitz: $9.450 \text{ m}^3/\text{h}$, A198 $Q_{z,\text{max}}$: $5.000 - 8.580 \text{ m}^3/\text{h}$!), ist zu erwarten, dass die Reduktion der Gesamtemission durch die dynamische Zuflussregelung sogar höher ausfallen würde, wenn eine gemäß A198 betriebene Kläranlage als Referenz dient. Die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Frachtreduktionen würde für den Fall der oberen Werte der Bandbreite ($8.580 \text{ m}^3/\text{h}$) je nach Ereignis bis zu 50% und im Mittel über alle Ereignisse ca. 14% betragen.

Insgesamt wurden durch die Steuerung des Zuflusses zur Kläranlage von Mitte Juni bis Ende August 2008 ca. 2.800 kg CSB , $130 \text{ kg NH}_4\text{-N}$ und $35 \text{ kg P}_{\text{ges}}$ weniger ins Gewässer eingetragen.

Abschließend ist festzuhalten, dass der Einsatz von Messtechnik und der Entwurf vorausschauender Regelungskonzepte anspruchsvolle Aufgaben sind, die zu vielversprechenden Ergebnissen führen. Eine **Übertragbarkeit in andere Gebiete** ist nur konzeptionell möglich, da jedes Einzugsgebiet, jedes Entwässerungssystem und jede Kläranlage individuelle Charakteristika aufweist, die jeweils in einer eigenen detaillierten Untersuchung identifiziert werden müssen. (vgl. Kapitel 7).

Ausblick / Optimierungspotential

Die großtechnischen Untersuchungen haben gezeigt, dass die dynamische Regelung des maximalen Mischwasserzuflusses bei günstigen Randbedingungen zu einer Reduzierung der Gesamtemission führen kann. Bei manchen Einzugsgebieten könnten sich infolge erhöhter Drosselabflüsse interessante Kosteneinsparungen durch nicht benötigte Beckenvolumina im Kanalnetz ergeben. Da im Jahresverlauf auch ungünstige Randbedingungen (z.B. drohende Überschreitung der Ablaufgrenzwerte der Kläranlage) auftreten können, muss zum Nachweis der Emission z.B. gemäß ATV A 128 diese Dynamik bei der Einstellung des zulässigen Drosselabflusses zur Kläranlage berücksichtigt werden. Eine Quantifizierung der Einsparung von Beckenvolumen könnte so durch den Nachweis der modellspezifischen Entlastungsfracht mit dem integrierten Modell Kläranlage und Kanalnetz einschließlich Regelungskonzept durchgeführt werden.

Bericht DBU-Projekt Phase 2

Eine Kosten-Nutzen-Analyse könnte weiterhin die betrieblichen Mehrkosten der Kläranlage als Folge der Mehrbehandlung an Mischwasser ermitteln, um sie den Einsparungen aufgrund geringerer Speichervolumina gegenüber zu stellen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die zusätzliche Fracht zeitversetzt ebenfalls in die Kläranlage gelangen würde, wenn zusätzliches Speichervolumen im Kanalnetz zur Mischwasserbehandlung realisiert würde.

Die parallele Verknüpfung mit einer Verbundsteuerung des Kanalnetzes ist ein weiterer Schritt im Hinblick auf eine vollständig integrierte Steuerung von Kanalnetz und Kläranlage. Die Verbundsteuerung verschiedener Steuereinrichtungen (Schieber, Wehre etc.) hat sich in den letzten Jahren in verschiedenen Kanalnetzen bewährt (z.B. Dresden, Wien, Bamberg). Der Betrieb ist zuverlässig und besticht durch die Nutzung vorhandener Kanalnetzvolumina anstelle von Speichervolumen in zu bauenden Becken. Insbesondere ergibt sich durch die Flexibilität dieses Konzepts eine Möglichkeit, besser auf Folgen des Klimawandels und des demografischen Wandels reagieren zu können.

Hinsichtlich des entworfenen Regelungskonzeptes erscheint eine im Rahmen des Forschungsprojektes bislang nicht näher verfolgte Optimierung durch folgende Punkte möglich:

- Begrenzung des maximalen Zuflussgradienten ($\max. \Delta Q_{zu}$ pro Zeitschritt) im Regler, um die Belastung der Nachklärung so gering wie möglich zu halten
- Folgende Störgrößen wurden bislang in erster Stufe noch nicht implementiert, erscheinen allerdings durchaus vielversprechend: Das CSB/NH₄-N Verhältnis sowie die NH₄-N_{ZB}-Fracht im Zulauf zur Belebung, weitere vereinfachte Ansätze zur Ermittlung der aktuellen Nitrifikations- und Denitrifikationskapazität sowie des Schlammspiegels (vgl. Kap. 4.4.3), der TS-Gehalt im Rücklaufschlamm, die Länge des Mischwasserereignisses, Regenschreiber im Gebiet zur Prognose des Zuflusses.
- Einbeziehung der Konzentrationen im Zulauf der Kläranlage, um bei geringeren Werten als im Ablauf der Anlage gegebenenfalls eine Reduzierung des Zuflusses vorzunehmen (Einsparung von Energie).
- Die Messtechnik ist nicht immer zufrieden stellend. Ausfälle von Messsonden und gravierende Messungenauigkeiten können zu Fehleinschätzungen durch den Regler führen. Die automatisierte Plausibilitätskontrolle und die Schaffung von Ersatzwerten sind deshalb für den „automatisierten Normalbetrieb“ unumgänglich.
- Es bleibt zu erwähnen, dass die aktuelle „Justierung“ der Regelmatrix konservativ ausgelegt ist. Nach dem Sammeln weiterer Erfahrungen wird durchaus ein Potential gesehen, die verfügbaren Kapazitäten von Kläranlagen vermehrt ausreizen zu können.

Bericht DBU-Projekt Phase 2

Dank

Die Arbeit wurde zu einem großen Teil mit Mitteln der Deutschen Bundesstiftung Umwelt DBU (AZ 21372) gefördert. Unser Dank gilt weiterhin den SWC Chemnitz, insbesondere der Leiterin der Kläranlage, Frau Sundheim, und dem Regierungspräsidium Chemnitz für die sehr konstruktive Unterstützung des Forschungsvorhabens.

9 Literatur

- Ahnert, M., Blumensaat, F., Langergraber, G., Alex, J., Woerner, D.; Frehmann, T., Halft N., Hobus I., Plattes M., Spring V., Winkler S. (2007). "Goodness-of-fit measures for numerical modelling in urban water management – a review to support practical applications." 10th IWA Specialised Conference of Design, Operation and Economics of Large Wastewater Treatment Plants. September 9-13, 2007
- Alex J., Risholt L.P. und Schilling W. (1999). Integrated modelling system for simulation and optimization of wastewater systems. Proc. Vol. 3, 1553-1561, 8th Int. Conf. Urban Storm Drainage, Sydney, Australia.
- Armbruster M., Krebs P. und Rodi W. (2001). Numerical modelling of dynamic sludge blanket behaviour in secondary clarifiers. Water Science and Technology, 43 (11), 173-180
- ATV A128 (1992). Richtlinien für die Bemessung und Gestaltung von Regenentlastungsanlagen in Mischsystemen. Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik (GFA), St. Augustin.
- ATV A131 (1991 bzw. 2000). Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen (alt bzw. neu). Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik (GFA), St. Augustin.
- ATV A198 (2003). ATV-DVWK. Vereinheitlichung und Herleitung von Bemessungswerten für Abwasseranlagen. Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik (GFA), St. Augustin.
- ATV (1997). Auswirkungen der Mischwasserbehandlung auf den Betrieb von Kläranlagen. Arbeitsgruppe 2.12.1. Korrespondenz Abwasser, 44 (8), 1419-1428
- Bode H., Evers P. und Jardin N. (2002). Organisation der Niederschlagswasserbehandlung – Erfahrungsbericht über den Betrieb von 500 Niederschlagswasserbehandlungsanlagen. Schriftenreihe Gewässerschutz – Wasser – Abwasser (GWA) des ISA – Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen, Bd. 188, 23/1-23/19.
- Bruns, J. (1999). Dynamische Kopplung von Regenwasserbehandlung und Abwasserreinigung bei Mischwasserzufluss. Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, Bd. 151.
- Bornemann, C., Londong, J., Freund, M., Nowak, O.; Otterpohl, R., Rolfs, T.(1998)

Bericht DBU-Projekt Phase 2

Hinweise zur dynamischen Simulation von Belebungsanlagen mit dem Belebtschlammmodell Nr. 1 der IAWQ. Korrespondenz Abwasser 45. Jahrgang, Nr. 3/98 S. 455-462.

Durchschlag, A. (1990). Gesamtemission als Planungsgröße von Mischwasserentwässerungssystemen. Korrespondenz Abwasser, 37 (8), 889-893.

Erbe, V., Frehmann T., Geiger W.F., Krebs P., Londong J., Rosenwinkel K.-H. und Seggelke K. (2002). Integrated Modelling as an analysing and optimisation tool for urban watershed management. Water Science and Technology, 46 (6-7), 141-150.

Erbe, V. (2004). Entwicklung eines integralen Modellansatzes zur immissionsorientierten Bewirtschaftung von Kanalnetz, Kläranlage und Gewässer.

Fuchs, L., Beeneken, T., Nowak, R., Pfannhauser, G. (2007). Entwicklung und Implementierung einer Abflusssteuerung für das Kanalnetz der Stadt Wien. KA – Abwasser, Abfall 54 (7), 680-689.

Harremoës, P., Capodaglio, A.G., Hellström, B.G., Henze, M., Jensen, K.N., Lynggaard-Jensen, A., Ottepohl, R. und SØeberg. (1993). Wastewater treatment plants under transient loading – performance, modelling and control. Water Science and Technology, 27 (12), 71-115.

Häck, M., Nowack, G., Ueberbach, O. (1999). UV-Extinktionsmessung zur Überwachung und Optimierung von Abwasserableitung und Abwasserreinigung. Wiener Mitteilungen, Band 156, S. 25-48.

Härtel, L. (1990). Modellansätze zur dynamischen Simulation des Belebtschlammverfahrens. Schriftenreihe vom Institut für Wasserversorgung, Abwasserbeseitigung und Raumplanung der TU Darmstadt.

Itwh (2005). Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie GmbH, Kanalnetzbe-
rechnung – Modellbeschreibung – HYSTEM-EXTRAN Version 6, Hannover, 2005

itwh, ISI (2006). Abschlussbericht der 1. Phase des DBU-Forschungsprojektes „Entwicklung eines integrierten Steuerungs- und Betriebsverfahrens für die Teilsysteme Kanalnetz & Kläranlage zur deutlichen Reduzierung der Gewässerbelastung“ (AZ 21372). Institut für technisch wissenschaftliche Hydrologie GmbH (itwh), Institut für Siedlungs- und Industriewasserwirtschaft der TU Dresden (ISI.)

IWU (2002/2003). ZKA Chemnitz Heinersdorf, Hydraulische Berechnung 2002/2003,

Bericht DBU-Projekt Phase 2

Ingenieurbüro für Wasserbau und Umweltplanung

- Krauth K. und Schwentner G. (1994). Betrieb von Abwasserbehandlungsanlagen bei Regenwetterzufluss. Schriftenreihe „WAR“, Universität Darmstadt, Heft 75, 41-63.
- Krebs, P. (2000). Stofftransport in der Siedlungsentwässerung. In Dresdner Berichte, Vol. Band 16, pp. 85-108. TU Dresden, Institut für Siedlungs- und Industriewasserwirtschaft.
- Krebs, P., Armbruster M. und Rodi W. (2000). Numerische Nachklärbecken-Modelle. KAWasserwirtschaft · Abwasser · Abfall, 47 (7), 985-999
- Krebs, P. (2008). Einfluss des Klimawandels auf die Siedlungswasserwirtschaft. Symposium; Herausforderungen für die Siedlungswasserwirtschaft, 25./26. September, Berlin.
- Lijklema, L., Tyson, J. M. und Le Souef A. (1993). Interactions between sewers, treatment plants and receiving waters in urban areas: a summary of the Interurba. 92 workshop conclusions, Water Science and Technology, 27 (12), 1-29.
- Meirlaen, J., van Assel, J., Vanrolleghem, P. (2002). Real time control of the integrated urban wastewater system using simultaneously simulating surrogate models. Water Sci. & Tec, 45 (3), 109-116.
- Nyberg, U., Andersson, B. und Aspegren, H. (1996). Real time control for minimizing effluent concentrations during storm water events. Water Science and Technology, 34 (3-4), 127-134.
- Otterpohl R. (1995). Dynamische Simulation zur Unterstützung der Planung und des Betriebs kommunaler Kläranlagen. Dissertation, Schriftenreihe Gewässerschutz - Wasser – Abwasser (GWA) des ISA – Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen, Bd. 151.
- Rauch W., Bertrand-Krajewski J.-L., Krebs P., Mark O., Schilling W., Schütze M. und Vanrolleghem P. (2002). Mathematical modelling of integrated urban drainage systems. Water, Science and Technology, 45 (3), 81-94.
- Schwentner G. und Krauth K. (1992). Einfluss von Stoßbelastungen bei Mischwasserzufluss auf die Ablaufqualität von Belebungsanlagen. Schriftenreihe des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft, Universität Karlsruhe, Bd. 64, 255 - 276.

Bericht DBU-Projekt Phase 2

- Seggelke K. (2002). Integrierte Bewirtschaftung von Kanalnetz und Kläranlage zur Reduzierung der Gewässerbelastung. Dissertation. Veröffentlichungen des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik, Universität Hannover, Heft 124.
- Seggelke, K. und Rosenwinkel, K.-H. (2004). Integrierte Bewirtschaftung von Kanalnetz und Kläranlage – Möglichkeiten durch das neue ATV-DVWK Arbeitsblatt A198. KA – Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall 51 (8), 843-856.
- Seggelke, K. (2007). Integrierte Bewirtschaftung von Kanalnetz und Kläranlage. Kolloquium am Institut für Siedlungs- und Industrierwasserwirtschaft TU Dresden, Dresdner Berichte 29, 75-95.
- Seggelke, K. (2008). Integrierte Steuerung von Kanalnetz und Kläranlage – Ziele und Anforderungen. 4. Frankfurter Abwassersymposium „Messen, Steuern, Regeln in der Entwässerung“, 23.9.2008, TAH Hannover
- Takács I., Party G.G. und Nolasco D. (1991). A dynamic model of the clarification-thickening process. Water Research, 25 (10), 1263-1271.
- Tränckner, J., Franz, T., Seggelke, K. Krebs, P. (2007) Dynamic optimisation of WWTP inflow to reduce total emission, Water Science and Technology 56 (10), 11-18
- Willems G., Rüschenberg M. und Bode H. (1999). Ausmaß des Mischwasserrückhalts bei der Niederschlagswasserbehandlung und die damit verbundenen Investitionskosten. Schriftenreihe Siedlungswasserwirtschaft Bochum, Ruhr-Universität Bochum, Bd. 36, 5-29.

Bericht DBU-Projekt Phase 2

10 Anhang

10.1 Modell-Detaills KA Chemnitz

Fraktionierung

Für das Kläranlagenmodell wurde die Fraktionierung im ASM1 angepasst. Die Konvertierungsformeln entsprechen den Standardvorgaben. Bei den Parametern mussten verschiedene Änderungen vorgenommen werden. Der Parameter aSI wurde nochmals korrigiert.

Name	Description	Unit	Conversion formula
SI	Soluble inert organic matter	g COD/m ³	cod*aSI
SS	Readily biodegradable substrate	g COD/m ³	cod*aSS
XI	Particulate inert organic matter	g COD/m ³	cod*aXI
XS	Slowly biodegradable substrate	g COD/m ³	max(0,cod*(1-aXI-aSS-aSI-aXB)-xba)
XBH	Active heterotrophic biomass	g COD/m ³	cod*aXB
XBA	Active autotrophic biomass	g COD/m ³	xba
SNO	Nitrate and nitrite nitrogen	g N/m ³	
SNH	NH ₄ (+) and NH ₃ nitrogen	g N/m ³	max(0,tkn-(iSS*SS+iXS*XS+iSI*SI+iXI*XI+iXB*(XBH+XBA)))
SND	Soluble biodegradable organic nitrogen	g N/m ³	SS*iSS
XND	Particulate biodegradable organic	g N/m ³	XS*iXS
SALK	Alkalinity	mol/m ³	salk

Tab. 10.1 Fraktionierung des Zulaufes

Name	Beschreibung	Einheit	Modell Kalibrierung (Ab-lauf VK)	Modell integriert (Zulauf VK)	Standardwerte nach Bornemann et al. (1998)
aSS	Anteil SS an CSB _{gesamt}	g CSB/g CSB	0.05	0.035	0.15
aSI	Anteil SI an CSB _{gesamt}	g CSB/g CSB	0.08	0.05	0.07
aXI	Anteil XI an CSB _{gesamt}	g CSB/g CSB	dynamisch	dynamisch	0.15
aXB	Anteil XBH an CSB _{gesamt}	g CSB/g CSB	0.12	0.13	0.2
iSS	Stickstoffanteil für SS	g N/g CSB	0.01	0.01	0.01
iSI	Stickstoffanteil für SI	g N/g CSB	0.02	0.02	k.A.
iXI	Stickstoffanteil für XI	g N/g CSB	0.03	0.03	k.A.
iXS	Stickstoffanteil für XS	g N/g CSB	0.03	0.03	0.03
iXB	Stickstoffanteil für XBH	g N/g CSB	s_fp('asm1m','iXB')		
salk	Alkalität	mol/m ³	10	10	8

Bericht DBU-Projekt Phase 2

Biologische Parameter

Tab. 10.2 Biologische Parameter

Parameter		Standardwert	Kalibrierwert
YH	Yield for heterotrophic biomass [g COD/g COD]	0.67	0.67
YA	Yield for autotrophic biomass [g COD/g COD]	0.24	0.24
iXB	Mass of nitrogen per mass of COD in biomass [g N/g COD]	0.086	0.086
iXP	Mass of nitrogen per mass of COD in products from biomass [g N/g COD]	0.06	0.06
fP	Fraction of biomass leading to particulate products [-]	0.08	0.08
muH20	Maximum specific growth rate for heterotrophic biomass [1/d]	4	4
KS	Half- saturation coefficient for heterotrophic biomass [g COD/m ³]	5	5
KOH	Oxygen half- saturation coefficient for heterotrophic biomass [g O ₂ /m ³]	0.2	0.2
KNO	Nitrate half- saturation coefficient for denitrifying heterotrophic biomass [g NO ₃ -N/m ³]	0.5	0.5
bH20	Decay coefficient for heterotrophic biomass [1/d]	0.4	0.4
bA20	Decay coefficient for autotrophic biomass [1/d]	0.15	0.07
nuG	Correction factor for muH under anoxic conditions [-]	0.8	0.8
nuH	Correction factor for hydrolysis under anoxic conditions [-]	0.6	0.4
kH20	Maximum specific hydrolysis rate [1/d]	3	3
KX20	Half- saturation coefficient for hydrolysis of slowly biodegradable substrate [-]	0.03	0.03
muA20	Maximum specific growth rate for autotrophic biomass [1/d]	0.9	0.9
KNH	Ammonia half- saturation coefficient for autotrophic biomass [g NH ₄ -N/m ³]	0.5	0.5
KOA	Oxygen half- saturation coefficient for autotrophic biomass [g O ₂ /m ³]	0.4	0.4
kA20	Ammonification rate [m ³ COD/(g*d)]	0.08	0.06
KalkH	Alkalinity half- saturation coefficient for heterotrophic biomass [mol/m ³]	0.1	0.1
KalkA	Alkalinity half- saturation coefficient for autotrophic biomass [mol/m ³]	0.25	0.25
KOan	Half-saturation coefficient for hydrolysis of O ₂ +NO-N under anaerobic conditions [g COD/m ³]	0.2	0.2
nuHA	Correction factor for hydrolysis under anaerobic conditions [-]	0.75	0.75
KNHNO	Half-saturation coefficient for incorporating of NH/NO by heterotrophs [g N/m ³]	0.1	0.1
SO _{Satt20}	DO Saturation Concentration for 20 grd C [g/m ³]	8.63736	8.63736

Bericht DBU-Projekt Phase 2

Nachklärung

Tab. 10.3 Parametersatz für das NKB-Modell Takács.

Parameter	Standardwert	Kalibrierwert
v_0 - maximale Sinkgeschwindigkeit [m/d]	370	variabel f(ISV)
v_p - praktische Sinkgeschwindigkeit [m/d]	142.9	142.9
r_h - Absetzparameter für Sinkgeschwindigkeit bei hohen Feststoffkonzentrationen [m ³ /g]	$3.78 \cdot 10^{-4}$	variabel f(ISV)
r_p - Absetzparameter für Sinkgeschwindigkeit bei niedrigen Feststoffkonzentrationen [m ³ /d]	$2.86 \cdot 10^{-3}$	$5.0 \cdot 10^{-3}$
f_{ns} - nicht absetzbarer Anteil der Feststoffe im Zufluss [-]	$2.28 \cdot 10^{-3}$	$2.28 \cdot 10^{-3}$
x_t - Schwellwert der Feststoffkonzentration [g/m ³]	3000	3000
Zuflussschicht	4	4
fTS - Korrekturfaktor $TS_{angewendet}/TS_{berechnet}$	1	1

Tab. 10.4 Parametersatz für das NKB-Modell Otterpohl-Freund.

Parameter	Standardwert	Kalibrierwert
ISV - Schlammvolumenindex [ml/g]	80	variabel
v_{ss} - Sinkgeschwindigkeit der Mikrofloken [m/d]	0.24	0.24
f_{i0} - maximaler Anteil der Mikrofloken [-]	0.04	0.06
f_{ia} - Abnahmekoeffizient des Anteils der Mikrofloken [m ³ /g]	$0.78 \cdot 10^{-3}$	$0.7 \cdot 10^{-3}$
Zuflussschicht	4	4
fTS - Korrekturfaktor $TS_{angewendet}/TS_{berechnet}$	1	1

Bericht DBU-Projekt Phase 2

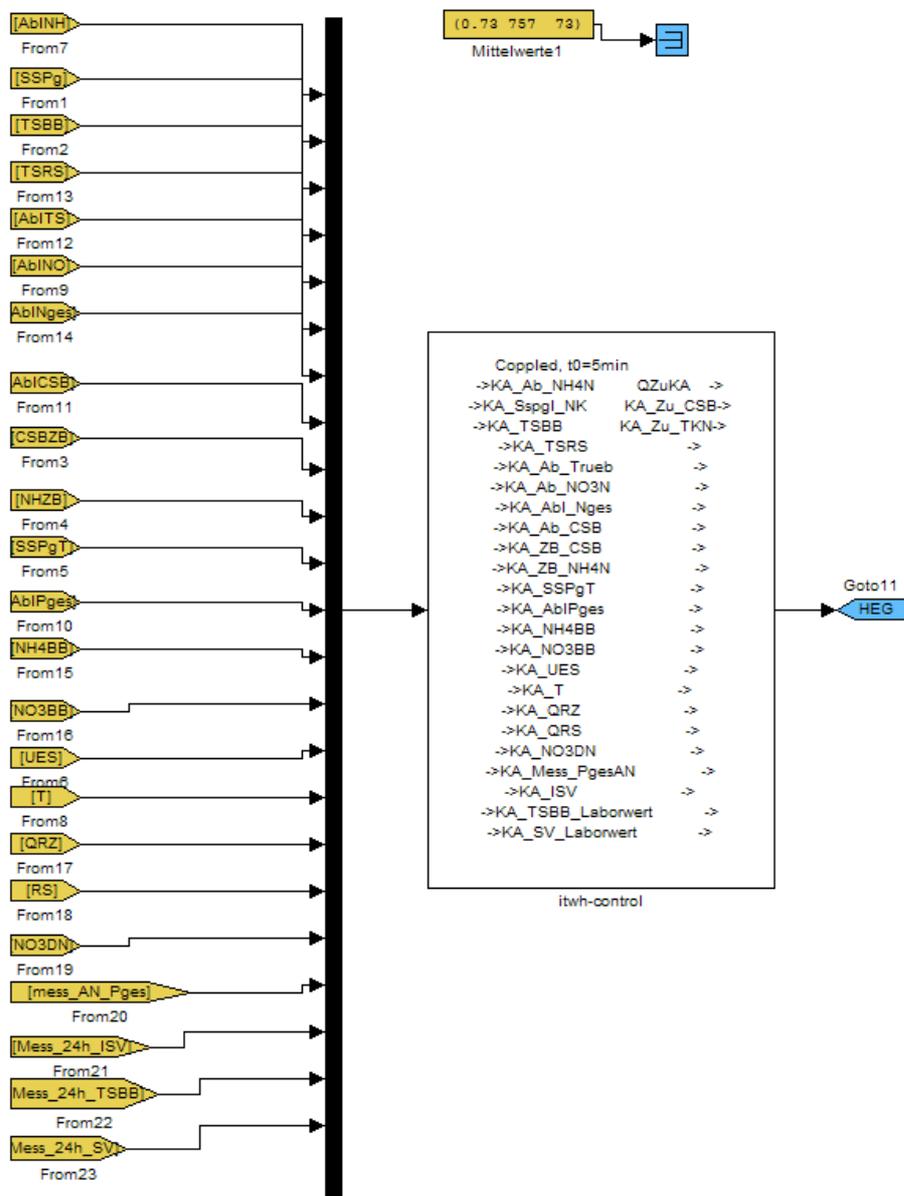


Bild 10.1 Kopplungsbaustein in SIMBA

Fraktionierung des Modells KA Chemnitz

Bericht DBU-Projekt Phase 2

10.2 Details zum Regelungskonzept

Tab. 10.5 Eingangsmessgrößen in CONTROL (Ersatz via Hilfselemente?)

	Einheit	Name in Control	Min	Max	Ersatz	Verwendung
Zulauf KA						
Q	m³/h	Steuer_Z_Q	0	11.000	-	Stellgröße
Q	m³/15min	Mess_Z_Q	0	11.000	-	N-Kap
Zulauf Belebung						
NH ₄ -N _{ZB}	mg/L	Mess_ZB_NH4N	0	80	33	N-Kap, RW
CSB _{ZB}	mg/L	Mess_ZB_CSB	0	1000	252	N-Kap, RW
Belebungsbecken						
NO ₃ -N _{DN}	mg/L	Mess_DN_NO3N	0	10	-	S, N-Kap
NH ₄ -N _{BB}	mg/L	Mess_BB_NH4N	0	20	-	S, N-Kap
NO ₃ -N _{BB}	mg/L	Mess_BB_NO3N	0	20	-	N-Kap
PO ₄ -P _{BB}	mg/L	Mess_BB_PO4N	0	5	-	P-Elimination
4x 6 x O ₂ -Messung	mg/L	Mess_BBx_x_O2	0	10	-	RW, N-Kap
6 x TS-Messung	g/L	Mess_BBx_TS	0	10	(fehlt)	N-Kap, RW
VSV	ml/L	Mess_BB_VSV	0	800	(fehlt)	S, RW
Temperatur	°C	Mess_BB_T	0	20	-	N-Kap
6 x Q _{Rezirkul.}	m³/15min	Mess_BBxQRZ	0	10.000	-	RW
ISV Labor	ml/g	Mess_BB_ISV_L	0	300	-	S
TS Labor	g/L	Mess_BB_TS_L	0	6	-	Referenz (zZt nicht!)
VSV Labor	ml/L	Mess_BB_VSV_L	0	800	-	S, RW
Nachklärung						
4 x Schlamm-spiegel	m	Mess_NKx_Sspgl	0	5	-	RW
4 x Q _{Rücklaufschl.}	m³ Sum	Mess_NKx_QRS	0	300.000	-	RW
TS RS	g/L	Mess_RS_TS	0	12	-	(S) (bislang nicht)
Überschussschlamm						
Q _{ÜS}	m³/15min	Mess_UES_Q	0	2800	-	RW
Ablauf Nachklärung						
NO ₃ -N _{AN}	mg/L	Mess_AN_NO3N	0	20	-	RW, N-Kap
NH ₄ -N _{AN}	mg/L	Mess_AN_NH4N	0	10	-	S, RW, N-Kap
CSB _{AN}	mg/L	Mess_AN_CSB	0	100	-	S
P _{ges,AN}	mg/L	Mess_AN_Pges	0	3	-	S
Trübung	TE/F	Mess_AN_Trueb	0	100	-	S
Q	m³/15min	Mess_AN_Q	0	10.000	-	RW
Legende: S: direkte Störgröße, RW: geht in Rechenwert, N-Kap: Verwendung in Ermittlung der Nitrifikationskapazität (bislang nicht eingesetzt), Ersatz: Ersatzwerte (bislang nicht)						

Bericht DBU-Projekt Phase 2

Tab. 10.6 Tabellarische Zusammenstellung der Rechenwerte

Name in CONTROL	Einheit	Erläuterung	Min	Max	Verwendung	Berechnung
RW_Z_Q	m³/h	Umrechnung in m³/h	0	15.000	N-Kap	Mess_Z_Q x 4
RW_AN_Q	m³/h	Umrechnung in m³/h	0	15.000	RW	Mess_AN_Q x 4
RW_Z_Qgradient	m³/(h·15min)	Anstieg QZ	0	10.000	S	Mess-Mess _{alt}
RW_ZB_Fracht_NH ₄ -N	kg/15min	Zulauf-Fracht	0		S (bislang nicht)	(Mess_Z_Q · Mess_ZB_NH4N)/1000
RW_ZB_CSB/NH ₄ N	-	Verhältnis CSB/NH ₄ -N	0	20	S (bislang nicht)	Mess_ZB_CSB / Mess_ZB_NHN
RW_BB_MW_TS1-6	g/L	Mittelwert TS _{BB}	0	8	S	Summe Mess1-6 / RS_Anzahl_Straßen
RW_BB1-6_MW_O ₂ _1	mg/L	Mittelwert O ₂	0	5	RW	
RW_BB1-6_MW_O ₂ _2	mg/L	Mittelwert O ₂	0	5	RW	
RW_BB1-6_MW_O ₂ _3	mg/L	Mittelwert O ₂	0	5	RW	
RW_BB1-6_MW_O ₂ _4	mg/L	Mittelwert O ₂	0	5	RW, S	
RW_BB1-6_Sum_QRZ	m³/h		0		N-Kap	(Summe 6xQRZ) x 4
RW_NK1_QRS	m³/15min	Bisher Summenwert! Umsetzung nur mit realen Messwerten!			RW	Mess-Mess _{alt}
RW_NK2_QRS	m³/15min				RW	Mess-Mess _{alt}
RW_NK3_QRS	m³/15min				RW	Mess-Mess _{alt}
RW_NK4_QRS	m³/15min				RW	Mess-Mess _{alt}
RW_NK1-4_Sum_QRS	m³/h	Summe			N-Kap	(Summe 4xQRS) x 4
RW_NK1-4_MW_Sspgl	m	Mittelwert			S	Mittelwert der 4 Messwerte
RW_NK1-4_Max_Sspgl	m	Maximum			S	Kommentar: Glättung wäre erforderlich
RW_UES_Q	m³/h	s. QRS			N-Kap	(Mess-Mess _{alt}) x 4
RW_NK_qA	m/h	Oberflächenbeschickung				=Q _{AN} /A _{NK} (9852)
RW_NK_qsv	l/(m²·h)	Schlammvolumenbeschickung				= qA·VSV (aus Labor!)
RW_AN_N _{gel}	mg/L				S	NH ₄ -N _{AN} +NO ₃ -N _{AN}
RW Ereignislänge						

Legende: S: direkte Störgröße, RW: geht in Rechenwert, N-Kap: Verwendung in Ermittlung der Nitrkapazität

Bericht DBU-Projekt Phase 2

Regel	Eingangsgrößen														Ausgangsgröße	Umsetzung						
	Zulauf	„Prognose“ biologische Prozesse				„Prognose“ Absetzkapazität NK				Behördliche Überwachungswerte (+ Trübung)					Regelinterpretier	in Chemnitz						
	Q _Z	O ₂ Online	TS _{BB,Onl}	NH ₄ -N _{BB}	PO ₄ -P _{BB}	ISV _{Labor}	VSV _{Online}	Max. SSpgl	MW SSpgl	NH ₄ -N _{AN}	N _{gel,AN}	CSB _{AN}	P _{ges,AN}	Trübung _{AN}	Q _{zu}	Mai/Juni 08	Juli/August 08					
01										> Hoch					Sehr Niedrig (8.100 m ³ /h = 2,25 m ³ /s)							
02											> Hoch											
03											= sehr hoch											
04												> Hoch										
05													> Hoch									
11										hoch	≤ hoch	≤ hoch	≤ hoch	≤ hoch	Niedrig (8.775 m ³ /h = 2,4375 m ³ /s)							
12										≤ hoch	≤ hoch	hoch	≤ hoch	≤ hoch								
13										≤ hoch	Hoch	≤ hoch	≤ hoch	≤ hoch								
14										≤ hoch	≤ hoch	≤ hoch	hoch	≤ hoch								
15										≤ hoch	≤ hoch	≤ hoch	≤ hoch	hoch								
16																						
17				> hoch																		
18																						
19																						
21		< niedrig																„Normal“ (9.450 m ³ /h)	„Normal“ (9.450 m ³ /h)			
22				hoch																		
23																						
24																						
25																						
28																						
29																						
201										Mittel	Mittel	≤ Mittel	≤ Mittel	≤ Mittel	„Normal“ (9.450 m ³ /h = 2,625 m ³ /s)							
202										≤ Mittel	Mittel	Mittel	≤ Mittel	≤ Mittel								
203										≤ Mittel	≤ Mittel	Mittel	Mittel	≤ Mittel								
205										≤ Mittel	≤ Mittel	≤ Mittel	Mittel	Mittel								
206										Mittel	≤ Mittel	Mittel	≤ Mittel	≤ Mittel								
207										Mittel	≤ Mittel	≤ Mittel	Mittel	≤ Mittel								
208										Mittel	≤ Mittel	≤ Mittel	≤ Mittel	Mittel								
209										≤ Mittel	Mittel	≤ Mittel	Mittel	≤ Mittel								
210										≤ Mittel	Mittel	≤ Mittel	≤ Mittel	Mittel								
211										≤ Mittel	≤ Mittel	Mittel	≤ Mittel	Mittel								
31	≥ MW	1 – 10 (entspricht: ≥ Mittel)	2,5 - 4 (= Mittel)	0 – 5 (entspricht: < hoch)	0-1	0-130 < hoch	0-400	0 - 2,2	0 - 2,2	≤ niedrig	Mittel	≤ Niedrig	≤ Niedrig	≤ Niedrig	Hoch (10.000 m ³ /h = 2,778 m ³ /s)	Hoch (10.000 m ³ /h)	Hoch (10.000 m ³ /h)					
32										mittel	≤ niedrig	≤ Niedrig	≤ Niedrig	≤ Niedrig								
33										≤ niedrig	≤ niedrig	mittel	≤ Niedrig	≤ Niedrig								
34										≤ niedrig	≤ niedrig	≤ niedrig	mittel	≤ niedrig								
35										≤ niedrig	≤ niedrig	≤ niedrig	≤ niedrig	Mittel								
36	≤ niedrig	≤ niedrig	≤ niedrig	≤ niedrig	≤ niedrig																	
41				0 - 5			(entspricht < hoch)	(entspricht < hoch)	(entspricht: < hoch)	≤ Niedrig	≤ Niedrig	≤ Niedrig	≤ Niedrig	≤ Niedrig	Sehr Hoch (11.000 m ³ /h) = 3,056 m ³ /s		Sehr Hoch (11.000 m ³ /h)					

1) Erläuterung: wenn pro Regel mehrere Eingangsgrößen, dann immer UND-Bedingung
 2) Regeln 31-35 und 41: Regeln mit Bedingungen und festen Werten definiert, d.h. Regel erfüllt, wenn Wert im angegebenen Wertebereich liegt! Nicht unscharf!
 3) Regeln nicht erfüllt, wenn Messwert „Ausfall“: wenn Messgerät Störung bzw. außerhalb Wertebereich oder wenn Fehler in Datentransfer (30min kein Wert)