

Merkblätter

Nr. 15

Simulation kommunaler Kläranlagen

– Hinweise zur Anwendung der dynamischen

Simulation am Beispiel von SIMBA® –



Simulation kommunaler Kläranlagen
- Hinweise zur Anwendung der dynamischen
Simulation am Beispiel von SIMBA® -

Essen, November 1998



Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen

Impressum:

Herausgegeben vom
Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen
Wallneyer Str. 6 • 45133 Essen
Telefon (0201) 7995 - 0 • Telefax (0201) 7995 - 1446/1447
e-mail: poststelle@essen.lua.nrw.de

Redaktion: Dipl.-Ing. in Kerstin Menn

ISSN 0947-5788

Informationsdienste: Umweltdaten aus NRW, Fachinformationen des LUA NRW:
• Internet unter <http://www.lua.nrw.de>
• T-online unter Landesumweltamt NRW # oder * 40045#

Bereitschaftsdienst: Nachrichtenbereitschaftszentrale des LUA NRW
(24-Std.-Dienst): Telefon (0201) 71 44 88

Vorwort

Noch vor einigen Jahren wurden Belebungsanlagen überwiegend nach dem ATV-Arbeitsblatt A 131 bemessen. Parallel hierzu wurden die „statischen“ Kläranlagen-Bemessungsprogramme entwickelt und, wie man am Beispiel des Programms ARABER demonstrieren kann, anwenderfreundlich weiterentwickelt. Entscheidend ist dabei, den maßgebenden Lastfall richtig festzulegen und den Sicherheitsfaktor so zu wählen, daß auf der einen Seite die Kläranlage die gesetzten Einleitungsgrenzwerte sicher einhält und auf der anderen Seite der Bürger nicht zu hohe Abwassergebühren bezahlen muß.

Ein neues Zauberwort bei der „Bemessung“ von Kläranlagen heißt „dynamische Simulation“. Hier muß das Mißverständnis allerdings ausgeräumt werden, daß Belebungsanlagen damit bemessen werden können; allenfalls ist von einer „Nach-Bemessung“ zu sprechen. Zunächst wird eine „statisch“ bemessene Belebungsanlage programmtechnisch nachgebildet. Erst dann werden mit dieser „Nachbildung“ die Betriebszustände „dynamisch“ simuliert, wobei unter verschiedenen Zulauf- und Betriebssituationen die sich ergebenden Ablaufwerte berechnet werden. Es besteht damit die Möglichkeit, den bei der „statischen“ Bemessung angesetzten Sicherheitsfaktor kritisch zu hinterfragen und ggf. an die örtlichen Notwendigkeiten anzupassen, um damit eine „Nach-Bemessung“ durchführen zu können.

Die Vorteile der „dynamischen Simulation“ haben das Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft dazu veranlaßt, das Programm SIMBA bei den Staatlichen Umweltämtern einzuführen. Um den Umgang mit dem Programm SIMBA zu erleichtern, wurden die vorliegenden „Hinweise zur Anwendung der dynamischen Simulation am Beispiel von SIMBA“ erarbeitet. Bei den Mitgliedern der damit beauftragten Arbeitsgruppe bedanke ich mich für die geleistete Arbeit. Möge das Programm SIMBA eine weite Verbreitung finden.



Dr. Ing. Harald Irmer
Präsident des
Landesumweltamtes NRW

Essen, im November 1998

Inhalt

Vorwort	3
1 Vorbemerkungen	8
2 Einsatzmöglichkeiten der dynamischen Simulation	10
3 Die Modelle und ihre Grenzen	12
3.1 Das Belebungsbeckenmodell (ASM 1):	13
3.2 Absetzbecken	13
3.3 Weitere Bausteine	16
4 Parameter für die dynamische Simulation	17
4.1 Zuflüßaufteilung	17
4.2 Parameter	19
4.3 Betriebliche Parameter	22
5 Vorgehen bei der dynamischen Simulation	23
5.1 Definition der Problemstellung	23
5.2 Erstellung des Simulationsmodells	23
5.3 Verifikation des Simulationsmodells (Modellabgleich)	23
5.4 Ermittlung des Anfangszustandes für die Simulation	24
5.5 Durchführung der Simulationsrechnungen	25
5.6 Auswertung der Simulationsergebnisse	25
5.7 Dokumentation der Simulationsergebnisse	25
6 Hinweise zur Dokumentation einer Simulationsstudie	26
7 Hinweise zur praktischen Arbeit mit SIMBA	28
7.1 Erarbeiten einer exakten Fragestellung	28
7.2 Sammeln von Informationen zu der zu simulierenden Kläranlage	28
7.3 Sammeln und Erfassen von Meßdaten	29
7.4 Aufbau der Anlage in SIMBA	29
7.5 Eingabe von Daten zur Simulation	30
7.6 Beispiel für das Vorgehen bei der Zuflüßaufteilung	33
7.7 Zustand und Workspace	35
7.8 Anlage von Dateien und Verzeichnissen zur Arbeit mit SIMBA	36

7.9 Durchführung von Simulationen	37
7.10 Auswertung von Simulationen	38
8 Anwendungsbeispiele	41
8.1 Simultane / Vorgeschaltete Denitrifikation	41
8.2 Speicherbecken	42
8.3 Denitrifikation in der Nachklärung bzw. in der Rücklaufschlammleitung	42
8.4 Regelbausteine	43
9 Ausblick und zukünftige Entwicklungen	49
9.1 Adressen	50
10 Literatur	51

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 2-1:	Einsatzbereiche und typische Aufgabenstellungen der Simulation bei der kommunalen und industriellen Abwasserreinigung	10
Tabelle 3-1:	Merkmale der in SIMBA verfügbaren Nachklärbecken-Modelle	16
Tabelle 4-1:	Mögliche Zuflüßaufteilung anhand von Erfahrungswerten	17
Tabelle 4-2:	Beispiel einer Zuflüßaufteilung mit Ermittlung des TKN	19
Tabelle 4-3:	Im ASM 1 berücksichtigte Prozesse	20
Tabelle 4-4:	Empfohlener Parametersatz für das IAWQ-Modell No. 1	21
Tabelle 7-1:	Beispiel für eine Matrix, wie sie für den Baustein "TG-Datei" benötigt wird	31
Tabelle 7-2:	Zustand und Workspace	35
Tabelle 7-10:	Symbole für Farben- und Linienarten in Matlab	39

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Eingangs- und Zielgrößen bei der statischen Bemessung und der dynamischen Simulation von Kläranlagen	9
Abbildung 4-1:	CSB- und Stickstoffbilanz des ASM 1	18
Abbildung 5-1:	Simulationsmodell	23
Abbildung 5-2:	Beispiel für die graphische Darstellung einer Modellverifikation	24
Abbildung 7-1:	Zu berücksichtigende Aspekte bei der Begehung einer Kläranlage vor der Erstellung eines Simulationsmodells	29
Abbildung 7-2:	Beispiel für eine Matrix, wie sie für den Baustein "From Workspace" benötigt wird	32
Abbildung 7-3:	Einbindung des Bausteins "From Workspace" in das Simulationsmodell	33
Abbildung 7-4:	Beispiel für die Gestaltung eines Bausteins für die Zuflüßaufteilung	34
Abbildung 7-5:	Beispiel für die Dateiorganisation in SIMBA (Pfadstruktur)	36
Abbildung 7-6:	Diagramm, das durch ein Matlab-Programm erzeugt werden kann	38
Abbildung 7-7:	Matlab-Programm zur graphischen Auswertung von Simulationsläufen	39
Abbildung 8-1:	Anordnung der Belebungsbecken in SIMBA zur Abbildung des Konzentrationsgradienten	41
Abbildung 8-2:	Einbindung eines Speicherbausteins	42
Abbildung 8-3:	Konfiguration zur Simulation einer wilden Denitrifikation in der Nachklärung und in einer langen Rücklaufschlammleitung	43
Abbildung 8-4:	P-Regler	43
Abbildung 8-5:	PI-Regler	44
Abbildung 8-6:	Schaltung zur wahlweisen Einstellung einer geregelten oder konstanten Luftzufuhr	45
Abbildung 8-7:	Steuerung der Belüftung in Abhängigkeit von der Ammonium-Konzentration im Ablauf	45
Abbildung 8-8:	Rücklaufschlammregler	46
Abbildung 8-9:	Überschußschlammregler	47
Abbildung 8-10:	Rezirkulationsregler	47
Abbildung 8-11:	Messung der NO ₃ -N-Konzentration im Ablauf einer variablen Denitrifikationszone	48

1 Vorbemerkungen

In Nordrhein-Westfalen (NRW) wird die bisher bei der Planung und Beantragung von Betriebsänderungen verwendete stationäre Berechnungsweise nach ATV Arbeitsblatt A131 oder dem HSG-Ansatz zunehmend durch Berechnungen mit dynamischer Simulation ergänzt. So können mit Hilfe der dynamischen Simulation kritische Betriebszustände der betreffenden Kläranlage im Vorfeld genauer untersucht werden. Es ist daher wichtig, daß nicht nur Planer und Betreiber, sondern auch die Mitarbeiter der Fachbehörden mit dem Werkzeug 'dynamische Simulation' vertraut sind.

Die bei der stationären Bemessung enthaltenen Sicherheiten können mit der dynamischen Simulation transparenter gemacht werden. So ermöglicht die dynamische Simulation gerade beim gestiegenen Zwang zur Sparsamkeit eine verantwortungsvolle Planung von Kläranlagen im Spannungsfeld 'Sicherheit \leftrightarrow Wirtschaftlichkeit'.

Unter der Vielzahl an Modellansätzen hat sich in den vergangenen 10 Jahren ein Modell zur dynamischen Simulation durchgesetzt, welches inzwischen weltweite Anerkennung gefunden hat. Dieses Modell wird als IAWQ-Modell No. 1 [Henze 1987] oder ASM 1 (Activated Sludge Model No. 1) bezeichnet. Ausgehend von diesem mathematischen Modell wurde eine Reihe von zunehmend komfortablen und leistungsfähigen Programmen entwickelt, welche unter anderem über P 111 (aqua system, Schweiz), ASIM (Prof. Gujer, Schweiz), ARASIM (Uni Passau + TH Aachen) und GPSX (Hydromentis, Kanada) bis zu SIMBA (ifak + Dr. Otterpohl) führten, dem heute in Europa am weitesten verbreiteten und neben GPSX leistungsstärksten Simulationsprogramm.

Das Programm SIMBA ist bei den Staatlichen Umweltämtern (StUÄ) in NRW eingeführt. Um die Arbeit mit der dynamischen Simulation speziell mit dem Programm SIMBA zu erleichtern, ist vom Landesumweltamt NRW eine Arbeitsgruppe ins Leben gerufen worden, in der Hinweise zur Anwendung der dynamischen Simulation am Beispiel von SIMBA erarbeitet werden.

Mitglieder dieser Arbeitsgruppe sind:

Herr Dipl.-Ing. Bürgel	(StUA Düsseldorf)
Herr Dr.-Ing. Buysch	(Landesumweltamt NRW)
Herr Dipl.-Ing. Freund	(Lippe Gesellschaft für Wassertechnik)
Herr Dipl.-Ing. Jakob	(StUA Aachen)
Herr Dipl.-Ing. Kuhlmann	(Bergisch-Rheinischer-Wasserverband)

Herr Dr.-Ing. Londong

(Wupperverband)

Frau Dipl.-Ing. Menn

(Landesumweltamt NRW)

Frau Dipl.-Ing. Sintic

(ISA der RWTH Aachen)

Herr Dr.-Ing. Stein

(Lippeverband / Emschergenossenschaft)

Das Landesumweltamt hat ebenfalls Hinweise für die Bemessung von Belebungsanlagen mit dem Bemessungsprogramm ARA-BER herausgegeben [LUA 1998]. Abbildung 1-1 verdeutlicht den Unterschied zwischen der statischen Bemessung und der dynamischen Simulation. Bei der Bemessung mit ARA-BER werden für statistisch ermittelte Lastfälle die erforderlichen Beckenvolumina von Kläranlagen berechnet, die mit großer Sicherheit die Einhaltung der geforderten Ablaufwerte gewährleisten. Im Gegensatz dazu wird bei der dynamischen Simulation das Betriebsverhalten der Anlage berechnet. **Es werden bei der dynamischen Simulation also keine Sicherheiten vorgesehen und auch keine Beckenvolumina berechnet.**

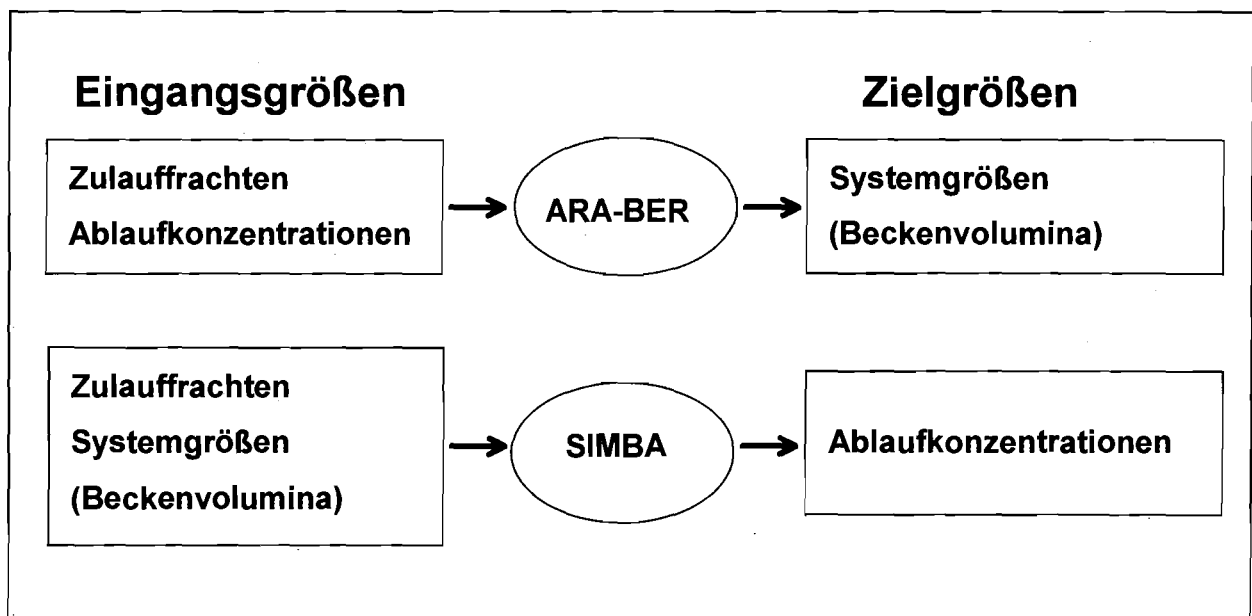


Abbildung 1-1: Eingangs- und Zielgrößen bei der statischen Bemessung und der dynamischen Simulation von Kläranlagen

Die ATV hat eine Arbeitsgruppe "Simulation von Kläranlagen" (ATV-Arbeitsgruppe 2.11.4, Sprecher Herr Dr. Londong) ins Leben gerufen. Der erste Arbeitsbericht dieser Gruppe [ATV 1997] liegt seit Herbst 1997 vor und befaßt sich ausführlich mit den Grundlagen der dynamischen Simulation.

2 Einsatzmöglichkeiten der dynamischen Simulation

Einsatzmöglichkeiten der dynamischen Simulation sind bei der Planung und dem Betrieb kommunaler Kläranlagen sowie bei der Aus- und Fortbildung des Kläranlagenpersonals zu finden. Beispiele sind in Tabelle 2-1 aufgeführt. Die Tabelle ist dem Arbeitsbericht der ATV-Arbeitsgruppe 2.11.4 „Simulation von Kläranlagen“ [ATV 1997] entnommen, der weitere Beispiele zur Anwendung der dynamischen Simulation behandelt.

Tabelle 2-1: Einsatzbereiche und typische Aufgabenstellungen der Simulation bei der kommunalen und industriellen Abwasserreinigung.

Einsatzbereich	Aufgabenstellung
Planung	<ul style="list-style-type: none"> · Ermitteln kritischer Belastungsfälle anhand der Grundlagendaten (z.B. Ganglinien von Temperatur, Frachten oder Abwasserzusammensetzung). · Unterstützen der Versuchsplanung und der Versuchsauswertung. · Erkennen kritischer Betriebszustände, die bei Umbaumaßnahmen (z.B. Revisionsarbeiten) auftreten können. · Überprüfen des Verhaltens der Anlage auf Dimensionierungs- und Betriebsführungsfehler. · Verschiedene Verfahrensvarianten unter gleichen Randbedingungen testen. · Entwickeln und Optimieren von Steuer- und Regelstrategien (z.B. Sauerstoffeintrag, Bewirtschaften von Rückbelastungen aus der Schlammbehandlung, Betrieb von Ausgleichsbecken, Unterteilen der Beckenvolumina in unterschiedliche Beckenteile, interne Rezirkulation, Zugabe von Fäkalschlämmen oder Zudosieren externer C-Quellen). · Ermitteln der erforderlichen Meßtechnik für die Umsetzung der Steuer- und Regelstrategien (z.B. Art, Anzahl und Anordnung von Meßsonden, Prozeßanalytoren). · Unterstützen der maschinentechnischen Auslegung (z.B. Ermitteln der Belüfter- und Pumpenabstufungen). · Beurteilen von Auswirkungen von Spitzenbelastungen und Änderungen der Abwasserzusammensetzung oder unvorhergesehene Entwicklungen im Einzugsgebiet. · Entwicklung von Ausbaukonzepten (Stufenlösungen).

Betrieb	<ul style="list-style-type: none"> · Lokalisieren von betrieblichen Schwierigkeiten (z.B. bei Änderung der Abwasserzusammensetzung im Einzugsgebiet, nicht aufeinander abgestimmte Steuer- und Regelstrategien). · Aufdecken von Meißfehlern (z.B. schlecht kalibrierte Zuflußmessung). · Entwickeln von Strategien für geplante Umbaumaßnahmen und Revisionsarbeiten(z.B. Reihenfolge der Außer- und Wiederinbetriebnahme von Anlagenteilen). · Optimieren der Leistungsfähigkeit der bestehenden Anlage auf der Grundlage der vorhandenen Meß-, Steuer- und Regeltechnik (z.B. Sauerstoffeintrag, Bewirtschaften von Rückbelastungen aus der Schlammbehandlung, Betrieb von Ausgleichsbecken, Zugabe von Fäkalschlämmen oder Zudosieren externer C-Quellen).
Aus- und Weiterbildung	<ul style="list-style-type: none"> · Verbessern des Prozeßverständnisses durch die Simulation unterschiedlicher Betriebszustände. · Darstellen von Prozessen und Größen, die über eine direkte Messung nicht zugänglich sind. · Erkennen und Unterscheiden von besonderen Betriebszuständen (z.B. Stoßbelastung) und Betriebsstörungen (z.B. Pumpenausfall, Auswirkungen toxischer Abwässer). · Bewerten von Eingriffen in die Betriebsführung bei besonderen Betriebszuständen (z.B. Stoßbelastung, Umbaumaßnahmen, Wartungsarbeiten, Betriebsstörungen).

Die dynamische Simulation ermöglicht dem Ingenieur einen Einblick in viele unterschiedliche Betriebszustände einer Anlage, enthebt ihn aber nicht seiner Aufgabe, die Berechnungsergebnisse kritisch zu beurteilen und im Auge zu behalten, welche Voraussetzungen zu diesen Ergebnissen geführt haben. Der Anwender einer Simulation muß daher ein fundiertes Fachwissen sowohl über die kommunale Abwasserreinigung als auch über die dynamische Simulation verfügen. Da es problematisch erscheint, das notwendige Fachwissen oder die Erfahrung eines Anwenders konkret zu quantifizieren, wird auf das Kapitel 6 zur Dokumentation einer Simulationsstudie hingewiesen. Sind alle dort beschriebenen Punkte bei der Simulation berücksichtigt und nachvollziehbar dokumentiert worden, ist davon auszugehen, daß es sich um eine fachgerecht durchgeführte Simulationsstudie handelt.

3 Die Modelle und ihre Grenzen

Die Grundlage der dynamischen Simulation bilden mathematische Modelle. Je nach Fragestellung und Zielsetzung sind Modelle erforderlich, die in geeigneter Weise die Transport- und Umwandlungsprozesse sowie die zur Umsetzung der Betriebsstrategien notwendigen maschinen- und MSR-technische Ausrüstung beschreiben können. Ein Modell ist immer nur ein mehr oder weniger gutes Abbild der Realität. Die Aussagefähigkeit eines Modells ist daher begrenzt und abhängig von der Fragestellung und der Zielsetzung bei der Modellentwicklung.

Ein Kläranlagenmodell besteht aus verschiedenen Modellbausteinen, die miteinander durch die Ein- und Ausgangsdaten gekoppelt sind. Zentraler Baustein der Kläranlagenmodelle zur Simulation von Belebungsanlagen ist das Modell der Belebungsbecken. Hier hat sich das schon eingangs erwähnte IAWQ-Modell No. 1 (ASM 1), das auf Stickstoff- und CSB-Bilanzen beruht, als sehr gut erwiesen. Es ist derzeit das einzige in der Fachwelt anerkannte und durch vielfältigen Einsatz erprobte Simulationsmodell für das Belebungsverfahren in der kommunalen Abwasserbehandlung. Die Phosphorelimination [biologische wie chemische] wird nicht berücksichtigt. Weitere Bausteine sind z.B. das Modell für die Vorklärung [Otterpohl 1994] und die Nachklärung [Otterpohl 1992], [Takacs1987].

Im Programm SIMBA ist eine Modellbibliothek mit verschiedenen Modellbausteinen realisiert worden, die ständig erweitert wird. Derzeit sind die folgenden Bausteine im Zusammenhang mit dem IAWQ-Modell No. 1 verfügbar:

- Speicherbecken
- Vorklärbecken
- Belebungsbecken
- Nachklärbecken
- 'Sequencing Batch' Reaktoren

Zukünftig werden Modellbausteine für die Abbildung der Prozesse in Adsorptionsstufen, in Kanalnetzen sowie in Biofilmreaktoren hinzukommen. Ein verbessertes Modell der Nachklärung mit Einbindung der biologischen Vorgänge in den Absetzbecken ist in Vorbereitung.

Weiterhin verfügt SIMBA auch über Bausteine, die das IAWQ-Modell No. 2 [Henze 1994] beinhalten, das zusätzlich die Prozesse der Phosphorelimination berücksichtigt. Dieses Modell ist in der Fachwelt sehr umstritten und sollte daher nur zu wissenschaftlichen Zwecken verwendet werden.

Im Herbst 1997 wurde ein Bio-P-Modell der TU Delft [Van Loosdrecht 1995] in das Programm SIMBA aufgenommen, das die Prozesse der biologischen Phosphorelimination zusätzlich zu den Prozessen der Stickstoffelimination beschreibt. Es bleibt abzuwarten, ob sich dieses Modell in Zukunft durchsetzen wird.

Die Auswahl der Modellbausteine zu Beginn einer Simulationsstudie ist eng mit der jeweiligen Fragestellung verknüpft. Die Anwendungsbereiche und -grenzen der unterschiedlichen Bausteine sind dabei zu berücksichtigen. Im folgenden Abschnitt werden diesbezüglich Hinweise zur Anwendung der Standardbausteine in SIMBA gegeben.

3.1 Das Belebungsbeckenmodell (ASM 1):

- Kommunal geprägtes Abwasser
- Übliche Verfahren der Stickstoffelimination und entsprechende Schlammalter bis zur Stabilisierung
- Übliche Abwassertemperaturen (5 bis 25°C)
- Keine Berücksichtigung der Phosphorelimination
- Keine Berücksichtigung der Beckenkonstruktion und der hydraulischen Verhältnisse (Der Baustein stellt einen ideal durchmischten Reaktor dar. Siehe auch Abschnitt 7.4)
- Keine Berücksichtigung von Nährstoffmangel beim Biomassewachstum, Schlammmentartungen und Wirkungen von Hemmstoffen

3.2 Absetzbecken

Zur Zeit ist keiner der Bausteine zur Modellierung von Absetzvorgängen in der Lage, eine ganz exakte Berechnung der Abtrennung von partikulären Stoffen durchzuführen. In den meisten Fällen reicht die mit den verfügbaren Modellbausteinen erzielbare Genauigkeit jedoch aus, um das Verhalten einer Kläranlage zu simulieren. In keinem der Modelle für die Vor- und die Nachklärung werden biologische und chemische Prozesse berücksichtigt. (Möglichkeiten, z. B. eine Denitrifikation in der Nachklärung zu simulieren, werden in Abschnitt 8.3 erläutert.)

Vorklärbeckenmodell:

- Kommunal geprägtes Abwasser mit üblichen Anteilen absetzbarer Stoffe mit üblicher Struktur
- Keine Berücksichtigung von Fällungsmechanismen, z.B. durch Industrieabwässer oder Zuführung des Überschussschlammes in die Vorklärung
- Keine Berücksichtigung der Beckenkonstruktion und der hydraulischen Verhältnisse. Der Baustein stellt einen ideal durchmischten Reaktor dar. Die Abtrennung der partikulären Inhaltstoffe wird in Abhängigkeit von der Aufenthaltszeit berechnet.
- Keine Berücksichtigung der unterschiedlichen Absetzbarkeit der Abwasserinhaltsstoffe bei Trocken- und Regenwetterzufluß
- Keine Begrenzung der Absetzleistung bei extrem langen Durchflußzeiten
Vorsicht !! Unter Umständen können dadurch negative Ablaufkonzentrationen partikulärer Inhaltstoffe auftreten.

Nachklärbeckenmodell 'Ideal' (siehe auch Tabelle 3-1):

- Ansatz einer vollständigen Abtrennung der partikulären Stoffe anstelle einer Berechnung der realen Absetzvorgänge in der Nachklärung
- Keine Berücksichtigung der Beckenkonstruktion und -geometrie
- Keine Berücksichtigung der Schlammstorage in der Nachklärung
- Keine Berücksichtigung des Beckenvolumens, dadurch: keine Durchflußzeit, keine Speicherung, keine Dämpfung der Konzentrationsganglinien
- Anwendung nur bei einfachen Simulationsstudien, in denen Mischwasserzufluß ohne Bedeutung ist, oder zur Erstellung eines Anfangszustandes.

Nachklärbeckenmodell 'Mix' (siehe auch Tabelle 3-1):

- Ansatz einer bestimmten Abtrennungsrates der partikulären Stoffe anstelle einer Berechnung der realen Absetzvorgänge in der Nachklärung
- Der Beckenbaustein stellt einen ideal durchmischten Reaktor dar. Die Durchflußzeit wird berechnet, eine Dämpfung der Konzentrationsganglinien findet statt.
- Stark vereinfachendes Modell der Schlamm-speicherung in der Nachklärung ohne Schlamm-eindickung
- Keine Berücksichtigung der Beckenkonstruktion und -geometrie
- Anwendung nur bei einfachen Simulationsstudien, in denen Mischwasserzufluß ohne Bedeutung ist, oder zur Erstellung eines Anfangszustandes.

Nachklärbeckenmodelle 'NK_OF' und 'NK_T' (siehe auch Tabelle 3-1):

- Grobe Abschätzung der Konzentration partikulärer Stoffe im Ablauf
- Keine Berücksichtigung der Beckenkonstruktion, nur Oberfläche und Tiefe der Becken werden berücksichtigt
- Der Schlamm-spiegel wird überschlägig ermittelt.
- Keine Berücksichtigung schwankender Absetzeigenschaften
- Simulation der Schlamm-eindickung und des Absetzvorgangs durch Aufteilung des Nachklärbeckens in 10 Schichten
- Hoher Rechenaufwand durch die Aufteilung des Nachklärbeckens in 10 Schichten
- Modell 'NK_T': Genauere Anpassung an ein spezielles Problem möglich, allerdings nur bei Kenntnis von aufwendig zu ermittelnden Parametern.
- Modell 'NK_OF': Recht gute Erfassung der Absetzvorgänge insbesondere bei Mischwasserzufluß. Eingabe von relativ leicht zu ermittelnden Parametern notwendig.

Tabelle 3-1: Merkmale der in SIMBA verfügbaren Nachklärbecken-Modelle

NK-Becken-Modell	Ideal	Mix	NK_OF	NK_T
Berücksichtigung von biologischen und chemischen Prozessen	nein	nein	nein	nein
Exakte Berechnung der Abtrennung von partikulären Stoffen	nein	nein	nein	nein
Grobe Berechnung der Konzentration partikulärer Stoffe im Ablauf	nein	nein	ja	ja
Berücksichtigung des Beckenvolumens	nein	ja	ja	ja
Volldurchmischer Reaktor	ja	ja	nein	nein
Oberfläche und Tiefe der Becken werden berücksichtigt	nein	nein	ja	ja
Abbildung des Abtrennungsvorgangs durch Ansatz einer vollständigen Abtrennungsrate der partikulären Stoffe	ja	nein	nein	nein
Abbildung des Abtrennungsvorgangs durch Ansatz einer bestimmten Abtrennungsrate der partikulären Stoffe	nein	ja	nein	nein
Simulation des Absetzvorgangs und der Schlammeindickung	nein	nein	ja	ja
Berücksichtigung der Schlammstorage in der Nachklärung	nein	ja	ja	ja
Überschlägige Ermittlung des Schlammpegels	nein	nein	ja	ja
Berücksichtigung schwankender Absetzeigenschaften	nein	nein	nein	nein
Anwendung für einfache Simulationsstudien, in denen Mischwasserzufluß ohne Bedeutung ist, oder zur Erstellung eines Anfangszustandes	ja	ja	nein	nein
Hoher Rechenaufwand	nein	nein	ja	ja
Eingabeparameter sind leicht zu ermitteln	ja	ja	ja	nein

3.3 Weitere Bausteine

Es ist mit SIMBA möglich, weitere Bausteine und Modelle zu erstellen und in eine Simulationsstudie einzubinden. Werden in SIMBA gegebene Bausteine in einer anderen als der im Handbuch angegebenen Funktion genutzt, ist dies vom Anwender gesondert zu dokumentieren (s. Kapitel 6). Zur Erläuterung weiterer in SIMBA standardmäßig verfügbarer Bausteine, die zur Abbildung einer Anlage benötigt werden (Teiler, Pumpen, Speicher, etc.), sei auf das SIMBA-Handbuch verwiesen.

4 Parameter für die dynamische Simulation

4.1 Zuflüßaufteilung

Bei der Verwendung des ASM 1 werden die Abwasserinhaltsstoffe in 13 Stoffgruppen aufgeteilt. Zusammen mit dem Volumenstrom selbst ergibt sich ein Vektor von 14 Werten. (siehe Abschnitt 7.5)

Tabelle 4-1: Mögliche Zuflüßaufteilung anhand von Erfahrungswerten

Stoffgruppe	Zulauf zur Kläranlage	Ablauf Vorklärung	Bemerkungen
S_i inerte, gelöster CSB	5 % vom CSB	7 % vom CSB	enthält ca. 2% Stickstoff (N_{org})
S_s rasch abbaubarer, gelöster CSB	15 % vom CSB	20 % vom CSB	enthaltener Stickstoff => S_{ND}
X_i inerte, partikulärer CSB	15 % vom CSB	10 % vom CSB	enthält ca. 3% Stickstoff (N_{org})
X_s langsam abbaubarer CSB	45 % vom CSB	48 % vom CSB	enthaltener Stickstoff => X_{ND}
X_{BH} aktive heterotrophe Biomasse	20 % vom CSB	15 % vom CSB	enthält 8,6% Stickstoff (N_{org})
X_{BA} aktive autotrophe Biomasse	0,02 mg/l	0,01 mg/l	
X_p partikuläre Zerfallsprodukte der Biomasse	0,02 mg/l	0,01 mg/l	
S_o Sauerstoff	0,1 mg/l	0,1 mg/l	
S_{NO} Nitrat	Meßwert (≈ 0)	Meßwert (≈ 0)	
S_{NH} Ammonium	Meßwert	Meßwert	
S_{ND} biologisch abbaubarer, gelöster organisch gebundener Stickstoff	1 % von S_s	1 % von S_s	ca. 0 bis 2% von S_s
X_{ND} biologisch abbaubarer, partikulärer organisch gebundener Stickstoff	3 % von X_s	3 % von X_s	ca. 2 bis 4% von X_s
S_{ALK} Alkalität	8 mmol/l	8 mmol/l	besser: Meßwert

Die Tabelle 4-1 und Tabelle 4-2 machen deutlich, daß zunächst nicht alle Stoffgruppen durch Messungen bestimmt werden müssen, sondern daß eine Fraktionierung zunächst

auf der Basis von leicht bestimmbareren Stoffen bzw. Stoffgruppen wie CSB, NH₄-N, NO₃-N vorgenommen werden kann. Die Übereinstimmung zwischen der tatsächlichen und der hier vorgeschlagenen Fraktionierung zeigt sich bei der Durchführung des Modellabgleichs (siehe Abschnitt 5.3). Die Erfahrung zeigt, daß bei einzelnen Kläranlagen große Abweichungen von diesen Werten möglich sind.

Im ASM 1 enthalten einige CSB-Fractionen organisch gebundenen Stickstoff. Dieser muß beim Vergleich von gemessenem und berechnetem TKN im Zufluß berücksichtigt werden. In Tabelle 4-2 und Abbildung 4-1 ist dies anhand eines Beispiels erläutert.

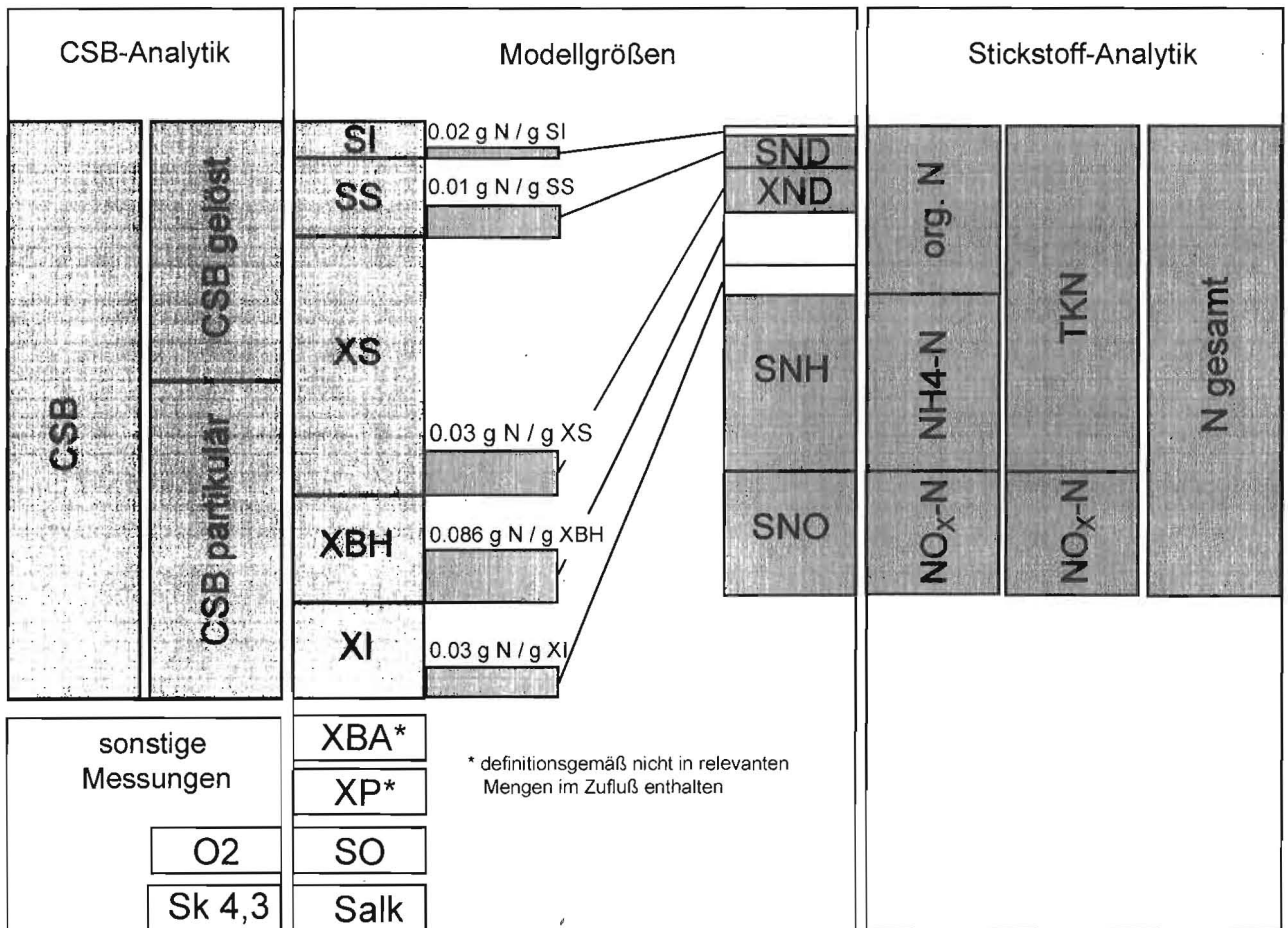


Abbildung 4-1: CSB- und Stickstoffbilanz des ASM 1

Tabelle 4-2: Beispiel einer Zuflüßaufteilung mit Ermittlung des TKN

Meßwert Zulauf	Stoffgruppe	Berechnung	Konzentration	Berechnung	TKN - Konzen- tration
CSB = 600 mg/l	S ₁	0,05 x 600	30 mg/l	0,02 x 30	0.6 mg/l
	S _S	0,15 x 600	90 mg/l		-
	X ₁	0,15 x 600	90 mg/l	0,03 x 90	2.7 mg/l
	X _S	0,45 x 600	270 mg/l		-
	X _{BH}	0,20 x 600	120 mg/l	0,086 x 120	10.3 mg/l
-	X _{BA}	-	0,02 mg/l		-
-	X _P	-	0,02 mg/l		-
-	S _O	-	0,1 mg/l		-
0 mg/l	S _{NO}	-	0 mg/l		-
40 mg/l	S _{NH}	-	40 mg/l	=>	40 mg/l
-	S _{ND}	0,01 x 90	1 mg/l	=>	1 mg/l
-	X _{ND}	0,03 x 270	8 mg/l	=>	8 mg/l
-	S _{ALK}	-	8 mmol/l		-
			Summe TKN:		62.6 mg/l

Sollte bei einer Zuflüßaufteilung nach dem Beispiel in Tabelle 4-2 der errechnete TKN vom gemessenen abweichen, sind die Stickstoffanteile der Stoffgruppen S₁ und X₁ sowie die Anteile von S_{ND} bzw. X_{ND} an S_S bzw. X_S entsprechend sinnvoll anzupassen.

4.2 Parameter

Es werden 8 Prozesse berücksichtigt, die die Konzentration der einzelnen Fraktionen beeinflussen (Tabelle 4-3). Mit Hilfe der mathematischen Beschreibung dieser Prozesse läßt sich der zeitliche Verlauf der jeweiligen Konzentrationen berechnen. Diese mathematische Beschreibung beinhaltet kinetische und stöchiometrische Parameter. Die Abwasseraufteilung und die Parameter sind durch teilweise aufwendige Messungen abschätzbar (Liebeskind 1994).

Tabelle 4-3: Im ASM 1 berücksichtigte Prozesse

1	Kohlenstoffelimination (aerobes Wachstum heterotropher Biomasse)
2	Denitrifikation (anoxisches Wachstum heterotropher Biomasse)
3	Nitrifikation (aerobes Wachstum autotropher Biomasse)
4	Zerfall heterotropher Biomasse
5	Zerfall autotropher Biomasse
6	Ammonifikation
7	Hydrolyse partikulärer organischer Verbindungen
8	Hydrolyse der Stickstoffverbindungen

Liegen keine Erkenntnisse über die Zusammensetzung des Zuflusses und die kinetischen und stöchiometrischen Parameter einer Kläranlage vor, können zunächst Standardwerte verwendet werden (Tabelle 4-4). Diese Standardwerte wurden im Zuge verschiedener Simulationsstudien gewonnen und repräsentieren die mittleren Verhältnisse vieler Kläranlagen. Ob die Standardwerte für eine bestimmte Simulationsstudie geeignet sind, zeigt sich bei der Durchführung des Modellabgleichs (s. Kapitel 5, Verifikation des Simulationsmodells). Der Einsatz der Standardparameter ist zulässig, wenn mit einem Modellabgleich nachgewiesen werden kann, daß die Funktionsweise einer Kläranlage in der Realität und in der Simulation weitgehend übereinstimmen. Ist dies mit den Standardparametern nicht möglich, sind weitergehende Untersuchungen bezüglich der Parameter notwendig, und der Parametersatz ist entsprechend zu ändern.

Tabelle 4-4 gibt Werte für die kinetischen und stöchiometrischen Parameter ASM 1 an, die bei fehlenden Untersuchungen verwendet werden können:

Tabelle 4-4: Empfohlener Parametersatz für das IAWQ-Modell No. 1 [Bornemann 1998]

Parameter P		Wert X	T-Abh. θ^*	Schwankungsbreite
Y_H	Ertragskoeffizient der heterotrophen Biomasse [gCSB/gCSB]	0,67		0,60-0,70
Y_A	Ertragskoeffizient der autotrophen Biomasse [gCSB/gN]	0,24		
i_{XB}	Stickstoffanteil in der Biomasse [gN/gCSB]	0,086		
i_{XP}	Stickstoffanteil in den inerten Resten der abgestorbenen Biomasse [g N/gCSB]	0,06		0,05 - 0,07
f_p	Partikuläre inerte Fraktion der Absterbeprodukte [-]	0,08		0,07 - 0,1
μ_H	Wachstumsgeschwindigkeit heterotropher Biomasse [1/d]	4	0,069	3 - 6
K_S	Halbwertskoeffizient für das heterotrophe Wachstum [gCSB/m ³]	5		1 - 5
K_{OH}	Halbwertskoeff. für die Sauerstoffaufnahme der heterotrophen Biomasse [gO ₂ /m ³]	0,2		0,2 - 0,5
K_{NO}	Halbwertskoeff. für die Nitrataufnahme [gNO ₃ -N/m ³]	0,5		
b_H	Zerfallsrate heterotropher Biomasse [1/d]	0,4	0,069	0,3 - 0,5
b_A	Zerfallsrate autotropher Biomasse [1/d]	0,15	0,08	
η_a	Verminderung des Wachstums unter anoxischen Bedingungen [-]	0,8		
η_h	Verminderung der Hydrolyse unter anoxischen Bedingungen [-]	0,6		0,5 - 0,7
k_h	Hydrolyserate [1/d]	3	0,11	1 - 10
K_X	Halbwertskoeffizient für die Hydrolyse [-]	0,03	0,11	
μ_A	Wachstumsgeschwindigkeit autotropher Biomasse [1/d]	0,9	0,098	≤ 1,0
K_{NH}	Halbwertskoeffizient für die Ammoniumaufnahme [gNH ₄ -N/m ³]	0,5	0,069	0,2 - 0,7
K_{OA}	Halbwertskoeff. für die Sauerstoffaufnahme der autotrophen Biomasse [gO ₂ /m ³]	0,4		0,3 - 0,6
k_a	Ammonifikationsrate [1/d]	0,08	0,069	
$K_{ALK,H}$	Alkalität-Sättigungsbeiwert für heterotrophe Biomasse [mol/m ³]	0,1		
$K_{ALK,A}$	Alkalität-Sättigungsbeiwert für autotrophe Biomasse [mol/m ³]	0,25		
$K_{O,AN}$	Sättigungsbeiwert für Hydrolyse unter anaeroben Bedingungen [gCSB/m ³]	0,2		
$\eta_{H,AN}$	Korrekturfaktor für die Hydrolyse unter anaeroben Bedingungen [-]	0,75		0,65 - 1
$K_{NH,NO}$	NH- und NO-Sättigungsbeiwert für heterotrophe Biomasse [gN/m ³]	0,1		

*für temperaturabhängige Parameter gilt: $P(T) = X \cdot e^{(-\theta(20 - T))}$

4.3 Betriebliche Parameter

Weiterhin sind die betrieblichen Parameter zu berücksichtigen, die die Gegebenheiten der zu simulierenden Anlage (wie die Beckengrößen, die Führung der Abwasserströme oder Regelkreisläufe) beschreiben. Es hat sich gezeigt, daß die genaue Angabe der betrieblichen Parameter für die Zuverlässigkeit der Simulationsergebnisse von größter Bedeutung ist. **Konkret bedeutet das für die Durchführung einer Simulationsstudie, daß beim Auftreten von Unstimmigkeiten zunächst eine Übereinstimmung aller betrieblichen Parameter erreicht werden sollte, bevor die Zulaufaufteilung oder der Parametersatz angepaßt und verändert werden.**

5 Vorgehen bei der dynamischen Simulation

Die Simulation erfolgt üblicherweise in folgenden Arbeitsschritten:

5.1 Definition der Problemstellung

Wie in Kapitel 2 beschrieben, läßt sich die Simulation auf vielfältige Weise einsetzen. Es ist daher zu Beginn einer Simulationsstudie wichtig, die Fragestellung festzulegen und dabei zu beschreiben, welche Aufgabe die dynamische Simulation bei der Problemlösung erfüllen soll.

5.2 Erstellung des Simulationsmodells

Das Simulationsmodell einer Kläranlage umfaßt alle miteinander verknüpften Modellbausteine sowie die zugehörigen kinetischen, stöchiometrischen und betrieblichen Parameter und die Aufteilung des Zuflußvolumenstroms. Abbildung 5-1 verdeutlicht dies.

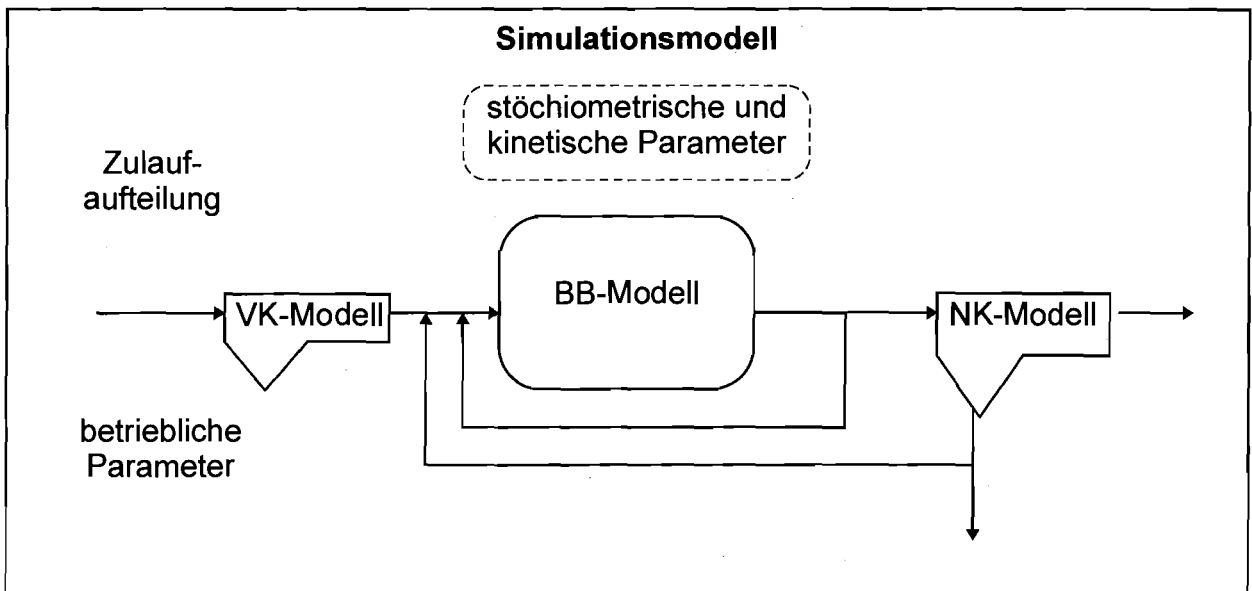


Abbildung 5-1: Simulationsmodell

5.3 Verifikation des Simulationsmodells (Modellabgleich)

Dies ist der Kern und der arbeitsintensivste Teil einer Simulationsstudie. Es ist im Rahmen einer Simulationsstudie durch eine Modellverifikation sicherzustellen, daß das erstellte Simulationsmodell das tatsächliche Verhalten der Kläranlage für die jeweilige Fragestellung richtig abbildet. Zu diesem Zweck werden Meßdaten vom Zu- und Ablauf der abzubildenden Kläranlage über einen längeren Zeitraum (ca. 2 Schlammalter) benötigt. Die Meßdaten sollten eine möglichst große Dichte (z. B. 2-h-Mischproben) besitzen, damit

Tagesschwankungen und Spitzenkonzentrationen erfaßt werden können. Die Verifikation eines Simulationsmodells ist erfolgreich, wenn bei einer Simulation mit den gegebenen Zulaufdaten eine weitgehende Übereinstimmung zwischen den berechneten und den gemessenen Ablaufdaten besteht. Es ist dabei zu berücksichtigen, daß es bei der Abwasserreinigung um biologische Modelle geht, die sich nur bis zu einem bestimmten Grad mathematisch abbilden lassen, so daß es nahezu unmöglich ist, eine exakte Übereinstimmung zwischen Simulation und Realität zu erreichen. Weiterhin sind immer auch die Meßwerte auf ihre Plausibilität hin zu prüfen. Abbildung 5-2 stellt ein Beispiel für eine durchgeführte Modellverifikation dar.

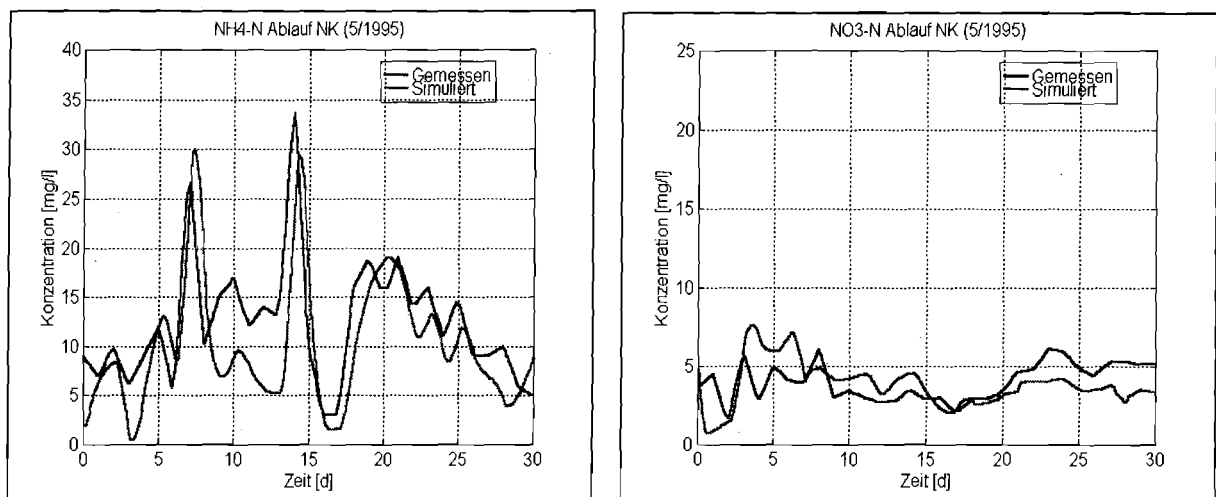


Abbildung 5-2: Beispiel für die graphische Darstellung einer Modellverifikation

Die Güte eines Modellabgleichs wird durch das Maß der Übereinstimmung zwischen gemessenen und simulierten Werten bestimmt. Eine vollkommene Übereinstimmung ist allerdings kaum zu erreichen. Dies ist u.a. bedingt durch Meßungenauigkeiten und durch Vereinfachungen, die im verwendeten Modell gemacht wurden. Der in Abbildung 5-2 dargestellte Modellabgleich hat eine Genauigkeit, wie sie im allgemeinen erreicht werden kann. Wichtig ist, daß die Größenordnung der Daten und der Verlauf der Ganglinie ungefähr getroffen werden.

5.4 Ermittlung des Anfangszustandes für die Simulation

Um eine Simulation über einen bestimmten Zeitraum durchführen zu können, benötigt das Simulationsprogramm einen Startwert für jede während der Simulation zu berechnende Größe. Die Gesamtheit der Startwerte wird als Anfangszustand bezeichnet. Bei der Erstellung eines neuen Simulationsmodells befinden sich alle benutzten Bausteine in einem Anfangszustand, der in SIMBA vorgegeben ist und nicht mit dem tatsächlichen Zustand

der realen Anlage übereinstimmt. Um einen passenden Anfangszustand für die Modellverifikation zu erhalten, muß das Modell, ähnlich wie bei einer realen Kläranlage, "eingefahren" werden. Dies geschieht am günstigsten, indem eine Simulation durchgeführt wird, bei der die Anlage solange mit einem gleichförmigen Abwasserzufluß beschickt wird, bis sich eine stabile Biomassenzusammensetzung einstellt. Die Abwasserzusammensetzung für den Einfahrtvorgang läßt sich zum Beispiel aus den mittleren gemessenen Zulauffrachten ermitteln. Der so berechnete Zustand kann dann abgespeichert werden und für die Modellverifikation sowie für nachfolgende Simulationsrechnungen als Anfangszustand verwendet werden. Werden gravierende Veränderungen am Simulationsmodell oder am Zulauf durchgeführt, muß ein neuer Anfangszustand erzeugt werden.

5.5 Durchführung der Simulationsrechnungen

Ist ein Anfangszustand gefunden und eine Modellverifikation erfolgt, können Simulationsläufe zur Bearbeitung der Aufgabenstellung durchgeführt werden. Es ist dabei sowohl zur besseren Orientierung für den Anwender als auch für die später folgende Dokumentation der Studie von großer Bedeutung, alle dabei durchgeführten Änderungen gegenüber dem Ursprungszustand schriftlich (am besten tabellarisch) festzuhalten.

5.6 Auswertung der Simulationsergebnisse

Die Auswertung der Simulation erfolgt am besten in grafischer Form. Dabei lassen sich die vielfältigen Möglichkeiten zur Erstellung von Diagrammen in Matlab oder Excel nutzen (siehe Abschnitt 7.10).

5.7 Dokumentation der Simulationsergebnisse

Die sorgfältige Dokumentation der Simulationsergebnisse ist von größter Wichtigkeit, da die Ergebnisse einer Simulationsstudie stark von den getroffenen Annahmen abhängig sind. Durch eine Dokumentation müssen die in der Simulation erzielten Ergebnisse transparent und nachvollziehbar gemacht werden. In Kapitel 6 sind Hinweise für die Dokumentation der Simulationsergebnisse gegeben.

6 Hinweise zur Dokumentation einer Simulationsstudie

Ziel der Dokumentation einer Simulationsstudie ist es, die getroffenen Annahmen und die Ergebnisse so festzuhalten, daß es einem Außenstehenden möglich ist, die Ergebnisse zu bewerten, nachzuvollziehen und ggf. zu reproduzieren.

Im einzelnen müssen folgende Punkte in der Dokumentation enthalten sein:

- **Beschreibung des Ziels der Simulation**

Zu Beginn einer Dokumentation ist die gegebene Problemstellung und das Ziel, das mit Hilfe der dynamischen Simulation erreicht werden soll, darzustellen.

- **Das verwendete Programm (hier SIMBA) und seine Versionsnummer**

- **Verwendete Modelle**

Sind die in der Simulation verwendeten Modelle feste Bestandteile des Programms, kann auf die Programmdokumentation hingewiesen werden. Alle Veränderungen, die an einem Modell durchgeführt werden, sind offenzulegen, detailliert zu beschreiben und nachvollziehbar zu begründen. Für die Simulation der Belebungsstufe einer Kläranlage kann derzeit nur das IAWQ Modell Nr. 1 (ASM 1) als zutreffend angesehen werden.

- **Meßdatengrundlage für den Modellabgleich**

Hier sind die gemessenen Parameter (Zuflußvolumenstrom, Kohlenstoffverbindungen, Stickstoffverbindungen, Temperatur), der Meßzeitraum, die Meßmethoden und die zeitliche Dichte der Messungen anzugeben. Eine graphische Darstellung der wichtigsten Eingabedaten sollte erfolgen.

- **Kinetische und stöchiometrische Parameter**

Die Dokumentation muß eine Liste der in der Simulationsstudie verwendeten kinetischen und stöchiometrischen Parameter enthalten, wie sie in der Datei "setpbio.m" angegeben sind. Abweichungen von den in diesem Papier angegebenen Parametern (Tabelle 4-4) sind in der Dokumentation zu begründen. Weiterhin sind die Temperaturen anzugeben, die bei den einzelnen Simulationsläufen vorgegeben wurden.

- **Zuflußaufteilung**

Die Berechnung der 13 Stofffraktionen aus den gegebenen Zuflußdaten ist darzustellen und zu erläutern.

- **Betriebliche Parameter**

Die betrieblichen Parameter wie Beckenvolumina, interne Ströme etc. sind anzugeben.

- **Abbildung der Simulationsmodelle**

Die Dokumentation muß eine Abbildung des verwendeten in SIMBA erstellten Simulationsmodells beinhalten. Das Verfahrensschema der realen Anlage und dessen Umsetzung im Simulationsmodell sind zu beschreiben. Jeder Baustein, der aus zu einer Gruppe zusammengefaßten Einzelbausteinen besteht (Subsystem), ist ebenfalls abzubilden und ggf. zu erläutern. Bei Variantenrechnungen sind die Veränderungen gegenüber dem Simulationsmodell, das für die Modellverifikation erstellt wurde, anzugeben.

- **Modellabgleich**

Der durchgeführte Modellabgleich ist genau darzustellen. Das Ergebnis des Modellabgleichs ist zu beurteilen. Dazu gehören eine Beschreibung des Anfangszustandes sowie eine graphische Gegenüberstellung der gemessenen und der berechneten Ablaufwerte der Stickstofffraktionen. Vereinfachungen und Annahmen, die hier getroffen wurden, sind zu erläutern und zu begründen.

Bei der Simulation von Betriebsvarianten sind alle gegenüber dem Modellabgleich vorgenommenen Veränderungen anzugeben. Die Ergebnisse der jeweiligen Variantenberechnung sind grafisch darzustellen, zu beschreiben und zu kommentieren.

- **Art der verwendeten Regelungs- und Steuerungsstrategien**

Verwendete Regelkreise und Steuermechanismen (z. B. zur Einstellung eines bestimmten Sauerstoffgehaltes in Belebungsbecken, die Entnahme von Überschußschlamm zur Einstellung eines festen TS-Gehaltes im Belebungsbecken oder die Dosierung von externem Substrat in Abhängigkeit von der Nitratkonzentration) sind zu erläutern.

- **Beurteilung der Simulationsergebnisse**

Die Ergebnisse der Simulationsstudie sind im Hinblick auf die Problemstellung und das zu erreichende Ziel zu beurteilen.

7 Hinweise zur praktischen Arbeit mit SIMBA

Die hier gegebenen Hinweise sind aufgrund von mehrjähriger Erfahrung mit der Durchführung von Simulationsstudien mit SIMBA zusammengestellt worden. Sie erheben selbstverständlich keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Es mag in einigen Punkten andere Möglichkeiten geben, um zum gleichen Ziel zu gelangen. Dem Anfänger auf dem Gebiet der dynamischen Simulation mit SIMBA soll dieses Kapitel zunächst Wegweiser bei der Arbeit mit SIMBA sein.

7.1 Erarbeiten einer exakten Fragestellung

- Welches Problem liegt bei der zu simulierenden Anlage vor?
- Welche Fragen können mit Hilfe der dynamischen Simulation beantwortet werden?
- Welche Betriebsvarianten sollen getestet werden?
- Was kann die dynamische Simulation nicht leisten?

7.2 Sammeln von Informationen zu der zu simulierenden Kläranlage (Abbildung 7-1)

- Begehung der Kläranlage am besten gemeinsam mit dem Betriebspersonal
- Informationen aus Plänen, Betriebstagebüchern, Angaben des Betreibers und des Betriebspersonals
- konstruktive Gestaltung der Anlage, Beckenkonfiguration, Volumina, Tiefen
- eingesetzte biologische Verfahren
- Sauerstoffzufuhr, -regelung, -verteilung und -konzentrationen in belüfteten Becken
- Rezirkulation und Rücklaufschlamm - Ströme und Führung
- Überschussschlamm : Wo wird wann welcher Volumenstrom abgezogen?
- Zudosierung von Chemikalien (Fällmittel, leicht abbaubares Substrat)
- Trockensubstanzgehalt in den Belebungsbecken
- Einleitung von Schlammwasser, Fäkalschlamm o. ä.: Wann werden an welcher Stelle welche Ströme mit welchen Konzentrationen eingeleitet?
- Funktionsweise der auf der Kläranlage verwendeten Meß- Steuer und Regelungseinrichtung

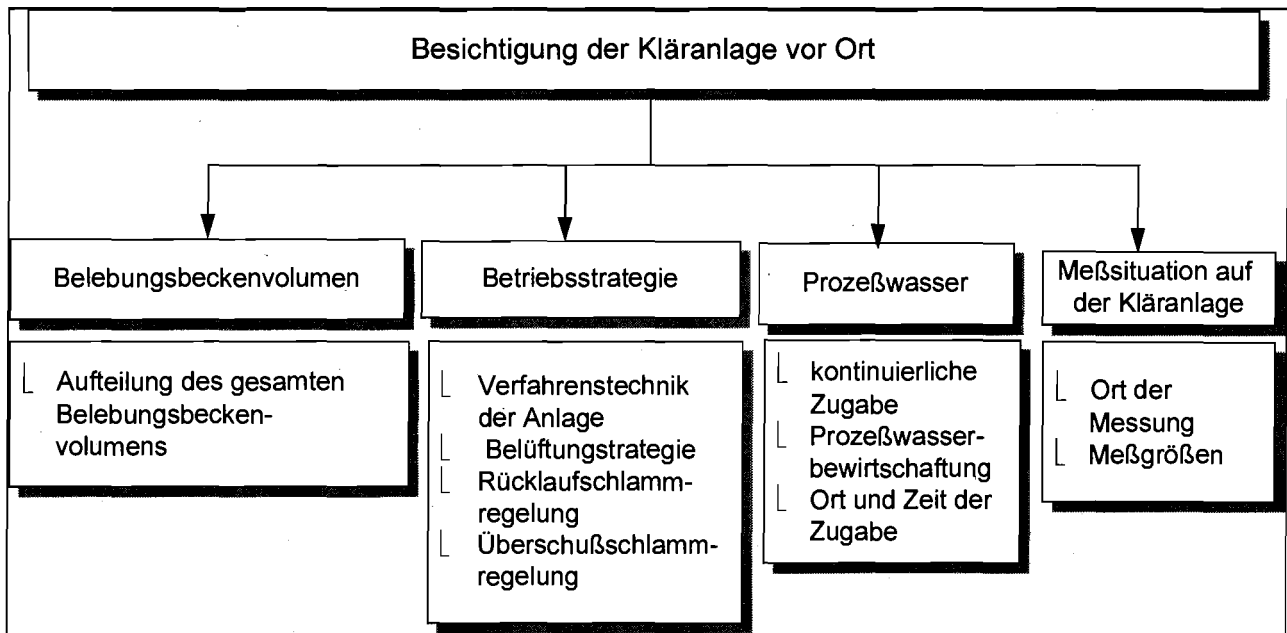


Abbildung 7-1: Zu berücksichtigende Aspekte bei der Begehung einer Kläranlage vor der Erstellung eines Simulationsmodells

7.3 Sammeln und Erfassen von Meßdaten

- Gemessene Parameter
- Meßstellen (Zulauf vor oder nach Vorklärung...)
- Länge des Zeitraums
- Art der Probenahme
- Zeitliche Dichte der Probenahmen
- Zuverlässigkeit der Meßwerte überprüfen
- Erfassung von Rückbelastungen
- Evtl. Erstellung eines Meßprogramms in Abhängigkeit von der Problemstellung

7.4 Aufbau der Anlage in SIMBA

- Zunächst wird anhand der Aufgabenstellung entschieden, welche Bausteine und Modelle benutzt werden sollen (ASM 1, Nachklärbeckenmodell, ...). Kriterien dazu sind u. a. in Kapitel 3 sowie im SIMBA-Handbuch zu finden. Die Auswahl der Blöcke und das Aufbauen einer Anlage geschieht durch Anklicken und Herüberziehen von Bausteinen aus den in SIMBA enthaltenen Bibliotheken in das Fenster für die neue Anlage.

- Die Belebungsbeckenbausteine in SIMBA stellen voll durchmischte Reaktoren dar, so daß es nicht möglich ist, Konzentrationsgradienten innerhalb eines Beckens abzubilden. Diesem Problem kann dadurch begegnet werden, daß statt eines einzelnen Beckens eine Beckenserie eingesetzt wird. Dies ist besonders bei Umlaufgräben von Bedeutung.
- Die Bezeichnung und die Numerierung der Becken sollten zur besseren Übersicht eindeutig und durchgängig sein.
- Bei mehrstraßigen Anlagen: Aufteilung des Volumenstroms oder Zusammenfassung der Straßen.
- Stellen im Abwasserstrom, die als interessant erscheinen, oder an denen Vergleichsmeßdaten aus der Kläranlage vorliegen, sollten mit einem Beobachter "to workspace" versehen werden, mit dessen Hilfe die berechneten Daten während der Simulation gespeichert werden. Es ist darauf zu achten, daß die Variablen, die in das Eingabefenster der Beobachter "to workspace" eingegeben werden und unter denen die berechneten Daten gespeichert werden, voneinander verschiedene Namen erhalten, so daß bei späterer Auswertung klar ist, von welcher Stelle im System die Daten stammen.
- Zur besseren Übersichtlichkeit können zusammengehörende Anlagenteile (z.B. Nitrifikationsbecken und Belüfterregelung) in "Subsystems" gruppiert werden. Diese Möglichkeit sollte jedoch nur in Maßen genutzt werden, da die Gefahr besteht, daß der Anwender aus den Augen verliert, was sich in den Subsystems befindet.

7.5 Eingabe von Daten zur Simulation

- Mit dem Baustein „Constant“ läßt sich ein beliebiger konstanter Wert über den Simulationszeitraum eingeben
- Mit dem Baustein "Tagesgang" kann ein Abwasserstrom erzeugt werden, der täglich wiederholt wird und dessen Volumenstrom um einen vom Benutzer vorzugebenden Mittelwert schwankt.
- Mit dem Baustein "TG-Datei" kann eine Matrix eingegeben werden, die die Fraktionen des Abwasserstroms über den Simulationszeitraum beschreibt (Bsp. s. Tabelle 7-1). Die Matrix kann z.B. mit MS-Excel berechnet und im txt-Format gespeichert werden. "TG-Datei" bezieht sich dabei auf das ASM 1, es müssen also 15 Spalten vorhanden sein, wobei die erste Spalte die Zeit angibt, die folgenden Spalten 2 bis 14 die Abwasserfraktionen beschreiben und die 15. Spalte für den Volumenstrom steht. Überschrei-

tet der simulierte Zeitraum die Zeitangabe in "TG-Datei" springt die Simulation wieder an den Anfang der Matrix zurück. Aus diesem Grund sollten die erste und die letzte Zeile der Matrix identisch sein. Man kann diese Funktionsweise zum Einfahren einer Anlage benutzen, indem der Zulauf eines Tages in TG-Datei angegeben wird und dann eine Simulation über einen längeren Zeitraum (z. B. zwei Wochen) durchführt.

Tabelle 7-1: Beispiel für eine Matrix, wie sie für den Baustein "TG-Datei" benötigt wird

0.0	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	8	1358.8
0.45	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	8	1435.6
0.86	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	8	1532.5
1.23	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	8	1649.8
1.58	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	8	1579.8
2.05	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	8	1506.7
2.73	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	8	1596.3
3.00	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	xy	8	1358.8

- Der Baustein "From File" funktioniert ähnlich wie der Baustein "TG-Datei", es lässt sich jedoch eine Matrix beliebiger Spaltenzahl eingeben (s. auch SIMBA Benutzerhandbuch). Die Berechnung springt jedoch nicht wie beim Baustein "TG-Datei" wieder an den Anfang der Matrix zurück. Außerdem wird hier nicht die gesamte Matrix zusammenhängend eingelesen, sondern jeweils nur die Zeilen für eine bestimmte Anzahl von Zeitpunkten, die vom Anwender anzugeben ist. Dadurch ist die Verarbeitung großer Dateien möglich.
- Mit dem Baustein „From Workspace“ können unter Einhaltung eines bestimmten Formates Matrizen beliebiger Spaltenzahl eingegeben werden. In einem Workspace werden Dezimalstellen mit einem Punkt und die Spalten einer Matrix durch Kommata getrennt. Das Ende einer Zeile wird mit einem Semikolon markiert, wie in Abbildung 7-2 dargestellt. (Diese Vorgaben können in der Windows Systemsteuerung unter "Ländereinstellung" gemacht werden, indem als Listentrennzeichen ein Komma, unter Zahlenformat als Dezimaltrennzeichen ein Punkt und kein Zeichen für das 1000er Trennzeichen gewählt werden. Beim Erstellen einer Matrix in Excel kann die Datei als "CSV Trennzeichen getrennt" mit der Dateierweiterung ".m" gespeichert werden.) Die Matrix kann in SIMBA geöffnet (Matlab-Fenster-Menüleiste => File =>open m.file...) und

bearbeitet werden. Die Abbildung 7-2 und die Abbildung 7-3 stellen dar, wie eine solche Matrix aussehen kann und wie die Einbindung in ein Simulationsmodell erfolgt.

Im hier angeführten Beispiel ist die Matrix, deren Werte in die Simulation eingehen soll, unter dem Dateinamen "PS16.m" im Anlagenverzeichnis gespeichert. Die Matrix enthält in der ersten Spalte die Zeit, in der zweiten Spalte den Volumenstrom Q, in der dritten Spalte die CSB-Konzentration, in der vierten Spalte die TKN-Konzentration und in der fünften Spalte die Ammonium-Stickstoff-Konzentration. Mit dem Baustein "From Workspace" in Abbildung 7-3 können während eines Simulationslaufs die jeweiligen Werte aus der Datei gelesen werden. Durch einen Doppelklick auf den Block "To Workspace" öffnet man ein Fenster, in das man den Namen der Datei eingibt, die eingelesen werden soll (hier: "PS16"). Zusätzlich zu dem Dateinamen gibt man in Klammern die Nummer eines "flag" ein, mit dem festgelegt wird, welche Spalte eingelesen werden soll. Der Block "From Workspace 2" (Abbildung 7-3) liest also die TKN-Konzentration aus Spalte 4 der Matrix ein. Diese Vorgehensweise läßt sich für beliebig viele Spalten und "flags" anwenden.

```
function y=PS16(flag);
y=[0 ,    3.0 ,    595 ,    65 ,    34 ;
0.27 ,    3.1 ,    829 ,    78 ,    39 ;
0.58 ,    2.5 ,    1064 ,    91 ,    43 ;
0.74 ,    1.9 ,    1298 ,    104 ,    47 ;
1.05 ,    1.3 ,    1532 ,    117 ,    52 ;
1.30 ,    3.2 ,    1552 ,    111 ,    47 ;
1.5 ,    3.0 ,    1117 ,    61 ,    29 ;
1.80 ,    2.9 ,    975 ,    79 ,    28 ;
2.1 ,    3.4 ,    879 ,    93 ,    33 ;
2.3 ,    3.4 ,    783 ,    107 ,    38 ;
2.55 ,    3.4 ,    686 ,    121 ,    43 ;
2.77 ,    2.0 ,    590 ,    135 ,    47 ;
3.0 ,    3.1 ,    1512 ,    98 ,    29 ];

if flag==2    y=y(:,[1:2]);    % Q
elseif flag==3    y=y(:,[1:3]);    % CSB
elseif flag==4    y=y(:,[1:4]);    % TKN
else            y=y(:,[1:5]);    % NH4
end;
```

Abbildung 7-2: Beispiel für eine Matrix, wie sie für den Baustein "From Workspace" benötigt wird

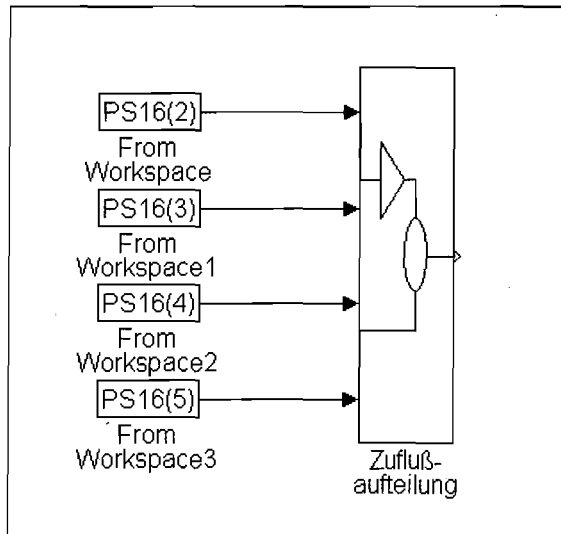


Abbildung 7-3: Einbindung des Bausteins "From Workspace" in das Simulationsmodell

- Die kinetischen und stöchiometrischen Parameter sind in der Datei "setpbio.m" anzugeben. Die Abwassertemperatur ist in der Datei "gloparam.m" festzulegen. Beide Dateien können im SIMBA-Control-Fenster mit der Menüleiste geöffnet und bearbeitet werden (Parameter => Globale Parameter => edit setpbio / edit gloparam). Bei einem Doppelklick auf die Schaltfläche "edit gloparam" bzw. "edit setpbio" werden lokale Kopien der Dateien "gloparam.m" bzw. "setpbio.m" im Anlagenverzeichnis erzeugt. Die in den Dateien "setpbio.m" und "gloparam.m" verwendeten Werte sind mit großer Sorgfalt zu kontrollieren und in der Dokumentation festzuhalten.

7.6 Beispiel für das Vorgehen bei der Zuflußaufteilung (siehe Kapitel 4)

- **Der Volumenstrom Q hat in SIMBA immer die Einheit m³/d.**
Dies hat nichts mit dem sonst in Bemessungen gebräuchlichen Q_d zu tun, sondern ist darauf zurückzuführen, daß in dem verwendeten Modell der maßgebende Prozeß das Wachstum der Biomasse ist und dieses üblicherweise in Tagen berechnet wird. Liegen Zuflußdaten vor, in denen der Zufluß in m³/h angegeben ist, müssen diese Werte einfach mit dem Faktor 24 multipliziert werden. Analog gilt für Angaben in m³/s der Faktor 24*3 600 = 86 400
- Die Berechnung der 13 Stofffraktionen für einen Simulationslauf aus Meßdaten kann z. B. mit Excel oder mit einem SIMBA-Baustein (s. Abbildung 7-4) erfolgen.
- Erforderliche gemessene Parameter: NH₄-N [mg/l], CSB [mg/l], Q [m³/d]. Liegt auch der TKN als Meßwert vor, so ist zu berücksichtigen, daß S_i, X_i und X_{BH} organisch gebundenen Stickstoff enthalten, der im ASM 1 zahlenmäßig nicht explizit berechnet wird. Bei

einem Vergleich zwischen gemessenem und im ASM 1 bilanzierten TKN sind diese Anteile zu berücksichtigen. Liegen keine CSB Messungen vor, kann er (mit entsprechender Unsicherheit) aus Ersatzwerten, z. B. BSB-M3-Messungen, abgeschätzt werden.

- Der CSB wird, wie in Kapitel 4 beschrieben, in biologisch „inerte“ (S_i, X_i) und biologisch "abbaubare" (S_s, X_s, X_{BH}) Anteile aufgeteilt.
- X_{BA}, X_P, S_O und S_{NO} , sind in der Regel nur in sehr geringen Konzentrationen im Zulauf der Anlage vorhanden ($\approx 0,02 - 0,01 \text{ mg/l}$). Die $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentration sollte stichprobenartig gemessen werden, um sicherzugehen, daß die hier getroffene Annahme korrekt ist.
- S_{ND} beträgt 0 bis 2% von S_s , X_{ND} beträgt 2 bis 4% von X_s .
- Die Alkalinität S_{ALK} im Zufluß wird - sofern keine Meßdaten vorliegen - zu 8 mmol/l angesetzt.

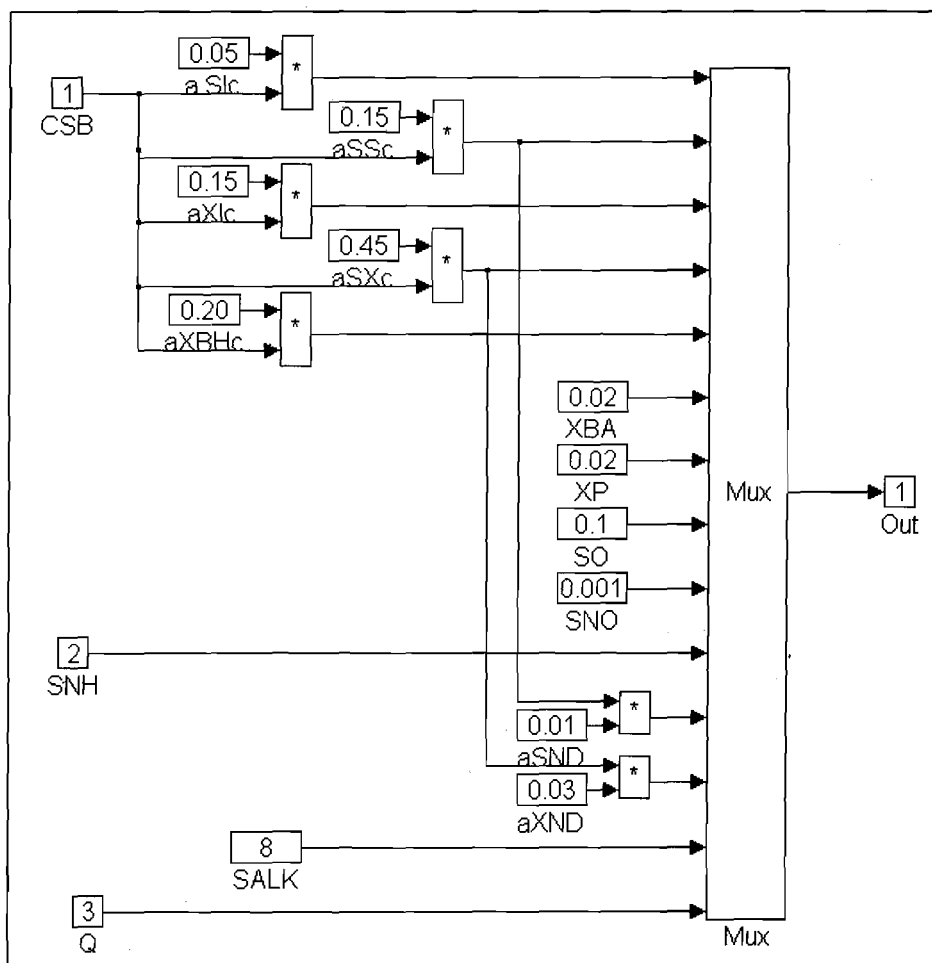


Abbildung 7-4: Beispiel für die Gestaltung eines Bausteins für die Zuflüßaufteilung

7.7 Zustand und Workspace

- Ein Workspace beinhaltet alle während eines Simulationslaufs aufgezeichneten Werte in Form einer großen Matrix und benötigt daher viel Speicherplatz.
- Ein Zustand beinhaltet alle für einen Zeitschritt berechneten Werte. In SIMBA kann der Zustand des letzten Simulationsschrittes separat gespeichert werden. Er kann dann als Ausgangszustand für eine weitere Simulation genutzt werden. Die folgende Tabelle 7-2 verdeutlicht das: die gesamte Tabelle steht für einen Workspace, eine Spalte steht für einen Block "to workspace", während eine Zeile einen Zustand darstellt.

Tabelle 7-2: Zustand und Workspace

Workspace					
	Zeitschritt	VK	D1	N1	NK
	1	14 Werte	14 Werte	14 Werte	14 Werte
	2	14 Werte	14 Werte	14 Werte	14 Werte
ein Zustand →	3	14 Werte	14 Werte	14 Werte	14 Werte
	•	•	•	•	•
	•	•	•	•	•
	•	•	•	•	•
	n-2	14 Werte	14 Werte	14 Werte	14 Werte
	n-1	14 Werte	14 Werte	14 Werte	14 Werte
	n	14 Werte	14 Werte	14 Werte	14 Werte

- Nach Abschluß eines Simulationslaufs über einen bestimmten Zeitraum kann der zuletzt berechnete Zustand gespeichert werden, so daß er als Ausgangszustand für die Simulation eines sich anschließenden Zeitraums wieder geladen werden kann. (siehe Kapitel 5.4 "Ermittlung des Anfangszustandes")
- Ein Workspace kann nach dem Ende eines Simulationslaufes ebenfalls gespeichert werden (Matlab-Fenster => Menüleiste => File => save workspace as). Dies ist sinnvoll, wenn man einzelne Variablen später mit gemessenen Werten oder mit anderen Simulationskonfigurationen vergleichen möchte. Erfolgt keine Speicherung, wird der Workspace bei dem danach folgenden Simulationslauf überschrieben. Will man einen bereits abgespeicherten Workspace wieder aktivieren, gibt man den Befehl "load 'Name des workspace'" in das Matlab-Fenster ein.

7.8 Anlage von Dateien und Verzeichnissen zur Arbeit mit SIMBA

- Die folgende Abbildung 7-5 zeigt eine Empfehlung zur sinnvollen und effizienten Dateiorganisation in SIMBA.

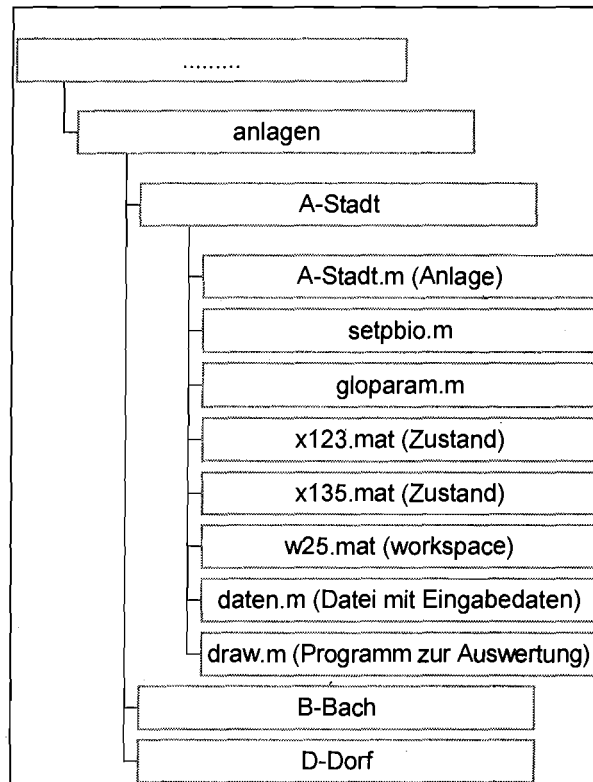


Abbildung 7-5: Beispiel für die Dateiorganisation in SIMBA (Pfadstruktur)

- Für jede zu simulierende Anlage richtet man ein eigenes Verzeichnis ein, das alle zur Anlage gehörenden Dateien enthält.
- Das Modell der Anlage erhält denselben Namen wie das übergeordnete Verzeichnis mit der Dateierweiterung ".m" (hier "A-Stadt.m").
- Bei einer Simulation ist darauf zu achten, daß dieser Name und der korrekte Pfad zu ihr im SIMBA-Control-Fenster angegeben ist. Falls nicht, muß die betreffende Anlage noch geöffnet werden.
- In das Verzeichnis sollten auch alle Zustände und Workspaces (s.u.) gespeichert werden. Sie erhalten die Dateierweiterung ".mat". Zur Unterscheidung erhalten Zustände Namen, die mit x beginnen, während Workspaces Namen erhalten, die mit w beginnen.
- Dateien und Programme, die mit dieser Anlage in Verbindung stehen, sollten ebenfalls in diesem Verzeichnis abgespeichert werden. Sie bekommen die Dateierweiterung ".m"

und können im Matlab-Fenster mit dem Menü-Befehl "open m-file" mit einem Text-Editor geöffnet werden.

- Während der Durchführung einer Simulationsstudie sollte das Speichern und Benennen von Zuständen und Workspaces gut strukturiert und dokumentiert erfolgen, so daß man auch nach längerer Zeit nachvollziehen kann, warum welche Daten gespeichert wurden und welche Einstellungen dabei zugrundelagen, damit die aus der Simulation gewonnenen Erkenntnisse nicht verloren gehen. Dies ist besonders wichtig, wenn verschiedene Varianten verglichen werden sollen.

7.9 Durchführung von Simulationen

- Vor dem Start einer Simulation ist sicherzustellen, daß der Arbeitsspeicher von Matlab leer ist. Dies geschieht mit Anklicken des Buttons "Clear all" in der Menüleiste des SIMBA-Control-Fensters.
- Dann muß ein Startzustand vorgegeben werden. Dies geschieht, indem man im SIMBA-Control-Fenster "Zustand => laden" anklickt und dann den gewünschten Zustand auswählt. Der Lade-Vorgang wird im Matlab-Fenster angezeigt "Lade Zustand...".
- Bei der ersten Simulation einer Anlage, bei der es noch keinen für die Anlage passenden Zustand gibt, greift SIMBA auf einen intern vorgegebenen Anfangszustand zu und dokumentiert dies im Matlab-Fenster durch die Angabe "Neuer Zustand...". Ein sinnvoller Anfangszustand ist dann wie in Kapitel 5.4 beschrieben zu erarbeiten.
- Im SIMBA Control-Fenster sind ebenfalls die Randbedingungen für die Simulation vor Durchführung einer Simulationsrechnung festzulegen bzw. zu überprüfen. In der Menüleiste ist unter "Parameter" das zu verwendende Modell (IAWQ-1 oder IAWQ-2) auszuwählen sowie die Besetzung der Parameter in den Dateien setpbio und gloparam festzulegen.
- Unter Optionen/Integrator lassen sich Parameter einstellen, die das Integrationsverfahren der Simulation beeinflussen, wie die Toleranz, die Zeitschrittweite, das Integrationsverfahren und der Simulationsmodus. Dabei sollte die in SIMBA vorgegebene Einstellung nicht zu sehr verändert werden.
- Je kleiner die Toleranz und die Zeitschrittweite, desto genauer die Berechnung, desto größer aber auch die Berechnungsdauer und der benötigte Speicherplatz.

- Als Integrationsverfahren ist "gear" zu empfehlen, da es sich als stabiles und schnelles Verfahren gezeigt hat.
- Während der Simulation können mit dem Baustein "Scope" die wichtigsten Parameter verfolgt werden. Dies ist besonders während der Erstellung eines Anfangszustandes interessant. Bei weiteren Simulationen ist zu berücksichtigen, daß die Rechenzeit für eine Simulation durch diesen Baustein stark verlängert wird.

7.10 Auswertung von Simulationen

- Nach Beendigung einer Simulation kann mit Hilfe der Mo-Taste im SIMBA-Control-Fenster der Simulationslauf an den mit dem Baustein "To workspace" ausgestatteten Stellen ausgewertet werden. Dazu muß der Name der Variablen des jeweiligen Bausteins "To workspace" in das Diagrammfenster eingetragen werden.
- Mit Hilfe von Matlab lassen sich kurze Programme schreiben, mit denen der Verlauf der berechneten Konzentrationen in einem Diagramm (Abbildung 7-6) darstellen läßt.

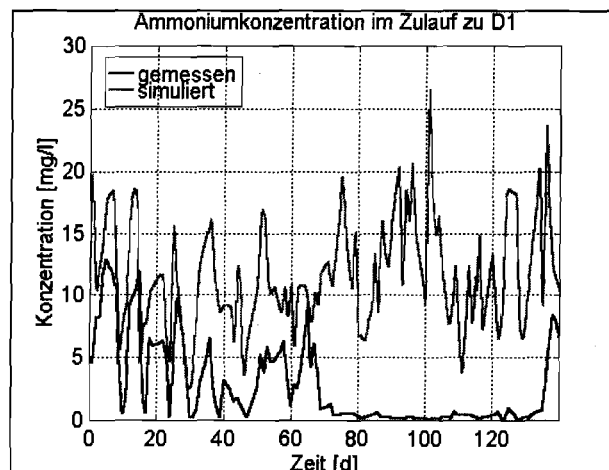


Abbildung 7-6: Diagramm, das durch ein Matlab-Programm erzeugt werden kann

Die grafische Auswertung geschieht mit Hilfe eines Programms (Abbildung 7-7), das im Matlab-Editor geschrieben und im entsprechenden Anlagenverzeichnis mit der Dateierweiterung ".m" gespeichert wird (z.B. "dr_am.m"). Das Programm wird durch die Eingabe des Programmnamens in das Matlab-Command-Fenster aktiviert. Kommentarzeilen werden mit "%" markiert.

```

load wmodab3; %Laden des Workspaces

a=plot(simba_t,mes(:,5),'k',simba_t,d1zu(:,10),'r');

%Befehl, ein Diagramm herzustellen, über den simulierten Zeitraum (simba_t) und Spalte 5 %des Beobach-
ters „mes“ sowie Spalte 10 des Beobachters „d1zu“.
%(:,10) gibt an, daß alle simulierten Zeitschritte in das Diagramm eingehen sollen.
%'k' steht für schwarz, 'r' für rot.

title('Ammoniumkonzentration im Zulauf zu D1','COLOR',[0,0,0]); %Titel des Diagramms, das in schwarzer Schrift erscheinen soll.
ylabel('Konzentration [mg/l]'); %Beschriftung der Achsen
xlabel('Zeit [d]'); %Anfang und Endwerte der Achsen
axis([0,140,0,30]); %Es soll ein Gitternetz gezeichnet werden
grid; %Hintergrundfarbe des Diagramms: weiß
set(gcf,'Color',[1,1,1]); %Die Achsen sollen schwarz sein
set(gca,'XColor',[0,0,0]); %Text der Legende
set(gca,'YColor',[0,0,0]); %Hintergrundfarbe der Legende: weiß
le=legend('gemessen','simuliert'); %Rahmenfarbe der Legende: schwarz
set(le,'Color',[1,1,1]);
set(le,'XColor',[0,0,0]);
set(le,'YColor',[0,0,0]);
ch=get(le,'Children'); %Farbe des Textes in der Legende schwarz
set(ch(2),'Color',[0,0,0]);
set(ch(4),'Color',[0,0,0]);
chl=get(gca,'Children'); %Liniendicke 2 in Legende und Diagramm
set(chl,'Linewidth',[2]);
set(ch(1),'Linewidth',[2]);
set(ch(3),'Linewidth',[2]);

```

Abbildung 7-7: Matlab-Programm zur graphischen Auswertung von Simulationsläufen

Die folgende Tabelle stellt die Symbole für die Farben und die Linienarten dar, die in Matlab möglich sind.

Tabelle 7-10: Symbole für Farben- und Linienarten in Matlab

Farbe	Abkürzung	Zahlenkombination	Linienart bzw. Markierungen	Symbol
gelb	y	1,1,0	durchgezogen	-
violett	m	1,0,1	gestrichelt	--
hellblau	c	0,1,1	gepunktet	:
rot	r	1,0,0	strichpunktiert	-.
grün	g	0,1,0	Kreise	o
blau	b	0,0,1	Kreuze	+
weiß	w	1,1,1	Punkte	.
schwarz	k	0,0,0	Sterne	*
			X	x

Will man die Kurven aus dem obigen Diagramm z. B. hellblau gestrichelt bzw. grün und mit Sternen markiert, sieht die zweite Zeile des Programms wie folgt aus:

```
"a=plot(simba_t,mes(:,5),'c--',simba_t,d1zu(:,10),'g*');".
```

Die Erstellung von Diagrammen aus Simulationsergebnissen ist also aufwendig. Hat man ein Programm, wie in Abbildung 7-7 dargestellt, aber einmal erstellt, läßt es sich mit geringfügigen Abänderungen und einer Kopie in das entsprechende Anlagenverzeichnis für die Auswertung vieler verschiedener Simulationsstudien einsetzen.

8 Anwendungsbeispiele

Dieses Kapitel stellt anhand einiger Beispiele dar, welche Möglichkeiten SIMBA bietet und auf welche Weise die vorgegebenen Bausteine genutzt werden können. Neben den SIMBA-Blöcken werden dafür auch SIMULINK-Blöcke verwendet, deren Nutzung kurz beschrieben werden soll.

Wer mit SIMBA arbeitet und kompliziertere Simulationen durchführen möchte, kann hier Ideen übernehmen oder Anregungen für spezifische Fragestellungen finden. Wer Simulationen und dafür verwendete Simulationsmodelle nachvollziehen möchte, kann anhand der hier vorliegenden Beschreibungen ein Grundverständnis für mögliche Verschaltungen entwickeln.

8.1 Simultane / Vorgeschaltete Denitrifikation

Eine simultane Denitrifikation wird im Simulationsmodell grundsätzlich gleich einer vorgeschalteten Denitrifikation aufgebaut (s. Abbildung 8-1).

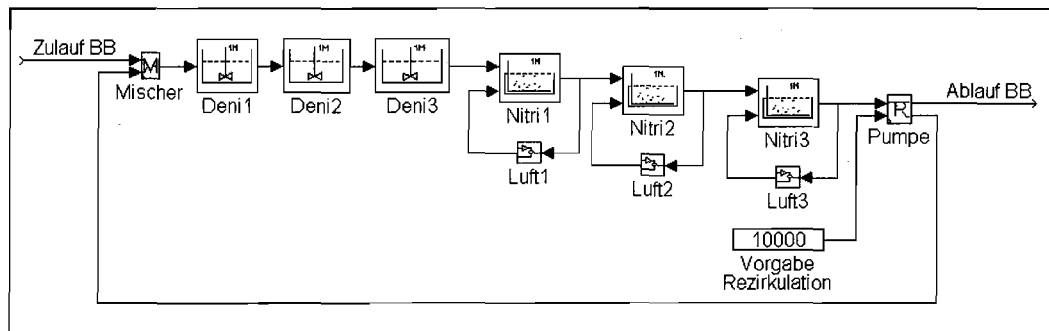


Abbildung 8-1: Anordnung der Belebungsbecken in SIMBA zur Abbildung des Konzentrationsgradienten

Je länger die Umlaufgräben bzw. die einzelnen Becken sind, desto mehr Reaktoren müssen im Simulationsmodell hintereinander geschaltet werden. Die Hintereinanderschaltung der einzelnen, jeweils vordurchmischten Reaktoren soll das Durchströmungsverhalten der realen Anlage wiedergeben (s. Kapitel 7.4).

Der Unterschied zwischen vorgeschalteter und simultaner Denitrifikation wird im Simulationsmodell über die Rezirkulation berücksichtigt. Während bei einer vorgeschalteten Denitrifikation die Rezirkulation auch in Wirklichkeit über Pumpen und Leitungen erfolgt, wird bei der simultanen Denitrifikation der Umlauf über eine "fiktive Rezirkulation" berücksichtigt. Sie beträgt ein Vielfaches von der Rezirkulation bei einer vorgeschalteten Denitrifikation. (Beispiel: Bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit des Abwassers in einem Umlauf-

graben von 0,3 m/s und einem Beckenquerschnitt von $A_{BB} = 18 \text{ m}^2$ ergibt sich eine fiktive Rezirkulation von $18 \text{ m}^2 \times 0.3 \text{ m/s} = 5,4 \text{ m}^3/\text{s} = 466\,560 \text{ m}^3/\text{d}$.)

8.2 Speicherbecken

Der Einsatz von Speicherbausteinen soll am Beispiel eines Pufferbeckens erläutert werden. Vom Zulauf der Anlage wird im vorliegenden Fall ein Teil des Wassers in das Speicherbecken gepumpt. Zusätzlich wird hier noch das Trübwasser eingeleitet.

Die Entleerung erfolgt durch die Vorgabe einer Ablaufmenge (Q_{ab}) zur Vorklärung hin. Der aktuelle Speicherinhalt wird am zweiten Ausgang ausgegeben und kann über ein Meßgerät beobachtet werden. Bei Vollenfüllung läuft das Becken über Ausgang (3). Der Überlauf kann z.B. abgeschlagen, in ein weiteres Becken geleitet werden oder ebenfalls in die Vorklärung erfolgen.

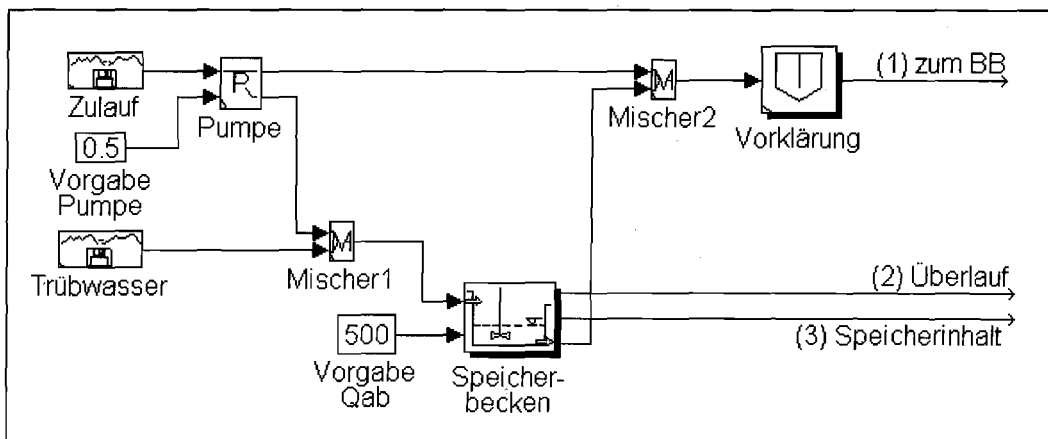


Abbildung 8-2: Einbindung eines Speicherbausteins

8.3 Denitrifikation in der Nachklärung bzw. in der Rücklaufschlammleitung

Die Nachklärbecken-Blöcke geben das Verhalten bei einer wilden Denitrifikation nicht wieder (s. Kapitel 3). Die Einflüsse der Gasblasen auf das Absetzverhalten lassen sich daher nicht nachbilden. In Grenzen können die Auswirkungen auf das Absetzverhalten durch eine Änderung der Sinkgeschwindigkeit der Mikrofloken v_{ss} (Block NK-OF) berücksichtigt werden. Die Denitrifikation in der Nachklärung kann durch ein nachgeschaltetes Denitrifikationsbecken abgebildet werden.

Auch Denitrifikationsprozesse im Leitungssystem bei sehr langen Rücklaufschlammleitungen können durch das Einschalten eines Denitrifikationsbeckens in die Rücklaufschlammleitung wiedergegeben werden (Abbildung 8-3).

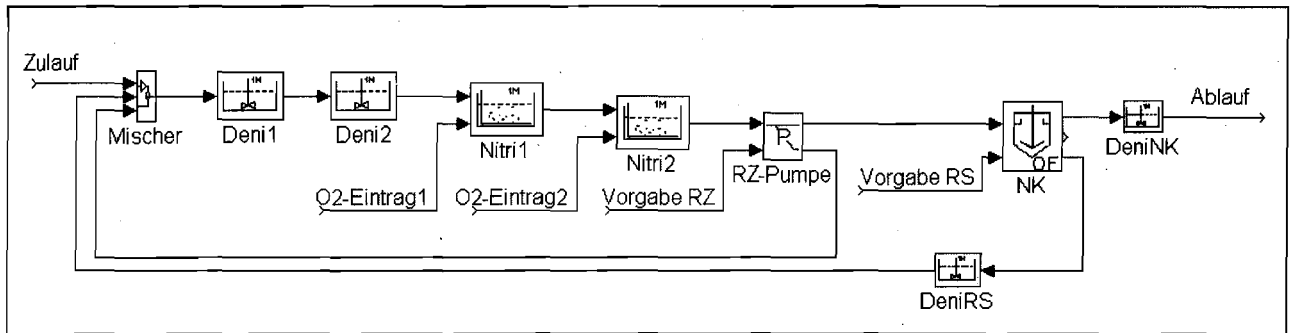


Abbildung 8-3: Konfiguration zur Simulation einer wilden Denitrifikation in der Nachklärung und in einer langen Rücklaufschlammleitung

8.4 Regelbausteine

P- und PI-Regler

Zunächst wird ein Proportional-Regler (P-Regler) vorgestellt, mit dem die Luftzufuhr in Abhängigkeit von der simulierten Sauerstoffkonzentration im Belebungsbecken eingestellt werden kann (s. Abbildung 8-4). Als Eingangswerte werden die simulierten Sauerstoffkonzentrationen im Ablauf des Belebungsbeckens (Eingang 1) und der gewünschte O_2 -Gehalt benötigt.

Im Function-Block (Simulink => Nonlinear) wird die Differenz der beiden Eingänge ermittelt ($u[1]-u[2]$). Die Differenz wird mit einem Verstärkungsfaktor $u[3]$ multipliziert. Der Verstärkungsfaktor gibt vor, wie intensiv die Luftzufuhr geregelt werden soll. Bei einem hohen Verstärkungsfaktor wird demzufolge im nächsten Zeitschritt die Luftzufuhr stärker verändert als bei einem niedrigeren Verstärkungsfaktor. Je größer die Differenz und je größer der Verstärkungsfaktor, desto stärker ändert sich von Zeitschritt zu Zeitschritt die Luftzufuhr. Diese Steuerungsart wird als P-Regler (Proportional-Regler) bezeichnet.

Der Block 'Saturation' begrenzt das Ausgangssignal (minimaler und maximaler Lufteintrag). Die Obergrenze wird durch die maximale Gebläseleistung vorgegeben.

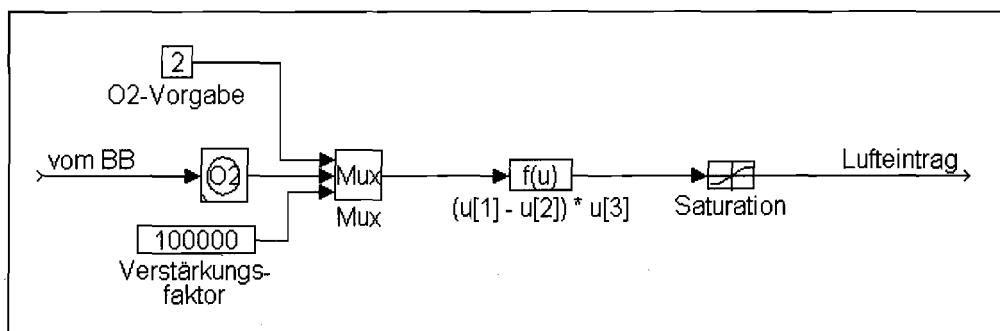


Abbildung 8-4: P-Regler

Wird das Signal integriert, erhält man einen Proportional-Integral-Regler (PI-Regler, s. Abbildung 8-5). Die Integration dient der Vergleichmäßigung des Regelsignals.

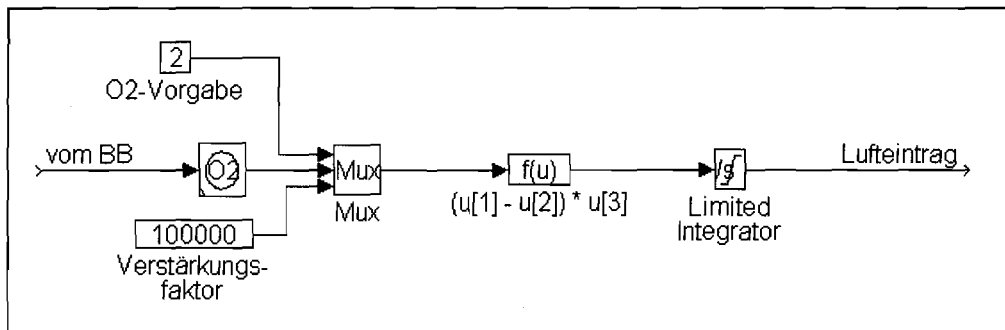


Abbildung 8-5: PI-Regler

Im PI-Regler werden die Differenzen zwischen gemessener und erwünschter Sauerstoffkonzentration ständig berechnet und anschließend integriert. Schwanken die Differenzen um den Wert Null, so ändert sich das Ausgangssignal nur unwesentlich. Die häufigen Änderungen des Luftertrages, die ohne Integrator auftreten würden, werden dadurch verringert.

Liegen über lange Zeiträume Differenzen eines Vorzeichens vor, so wird das Integral entsprechend groß. Das Ausgangssignal wird in diesem Fall verstärkt, so daß sich der Luftertrag schneller an die geänderten Sauerstoffkonzentrationen im Becken anpassen kann.

Im gegebenen Beispiel wurde ein Limited-Integrator (Simulink => Nonlinear) gewählt, der den Luftvolumenstrom begrenzt. Steigt (oder fällt) das Integral über (oder unter) die vorgegebene Grenze, so werden die nachfolgenden Werte nicht mehr aufintegriert.

Der Limited Integrator funktioniert quasi wie ein Überlauf im wasserbaulichen Sinne: Übersteigt die zufließende Wassermenge eine Grenze, so wird Wasser abgeschlagen. Im Unterschied dazu wäre eine Kombination aus Integrator und Saturation vergleichbar mit einem Speicherbecken: Hier wird die Wassermenge auch noch bei übersteigen der Grenze gespeichert (integriert) und wird anschließend abgeführt.

Sauerstoff-Regler

Um den realen Betrieb wiederzugeben, sollte eine Umstellung von einer O₂-Regelung zu einem konstanten Luftvolumenstrom möglich sein. Ein Beispiel für die Umsetzung im Simulationsmodell ist in Abbildung 8-6 zu finden. Der O₂-Regler mit seinen beiden Eingängen ist der zuvor beschriebene Steuerbaustein (Abbildung 8-5), der mit dem Befehl "group" zusammengefaßt wurde. Über einen Switch (Simulink => Nonlinear) kann geregelt

werden, ob das Signal des Regelbausteins oder eine konstante Luftmenge zum Ausgang kommt.

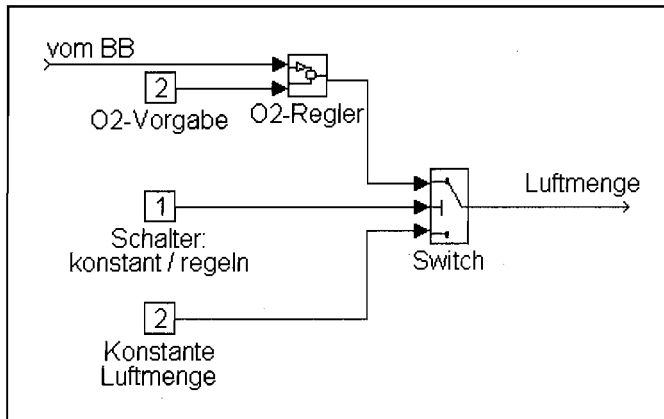


Abbildung 8-6: Schaltung zur wahlweisen Einstellung einer geregelten oder konstanten Luftzufuhr

Als weitere Möglichkeit der Sauerstoffregelung wird im folgenden eine NH_4 -Steuerung vorgestellt (s. Abbildung 8-7). Diese Regelung bietet sich als An- und Aus-Schalter für variable Nitri- / Denibecken an. Steigt die Ammoniumkonzentration über einen bestimmten Wert (Anschaltpunkt), wird das Becken belüftet. Sinkt sie unter den Ausschaltpunkt, wird die Belüftung ausgestellt, so daß denitrifiziert werden kann.

Der obere Teil des Beispiels in Abbildung 8-7 stellt die NH_4 -Regelung dar, durch die der Ein- und Ausschalter (Switch) gesteuert wird.

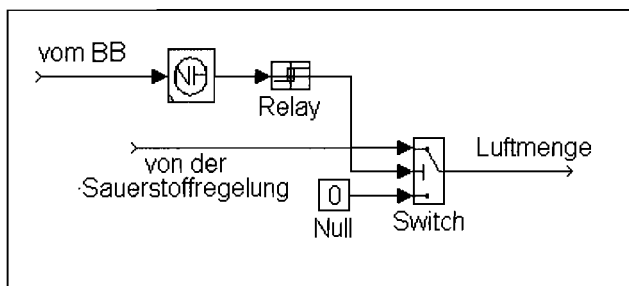


Abbildung 8-7: Steuerung der Belüftung in Abhängigkeit von der Ammonium-Konzentration im Ablauf

Die Ammonium-Regelung ist wie folgt aufgebaut: Am Eingang 'vom BB' wird der simulierte NH_4 -Wert im Ablauf der Belebung gemessen. Dieser wird durch einen Relay-Block (Simulink => Nonlinear) geschickt. Im Relay-Block werden ein oberer und ein unterer Stellwert vorgegeben. Bei Überschreitung des oberen Stellwertes wird die Belüftung angeschaltet, fällt der NH_4 -Wert unter den unteren Stellwert, wird die Belüftung ausgeschaltet.

Beispiel: Oberer Wert 3, unterer Wert 2. Steigt NH_4 über 3, geht der Regler an (Ausgang => 1). Fällt NH_4 wieder, stellt er sich erst bei 2 wieder aus (Ausgang => 0). Solange er danach nicht wieder 3 erreicht, bleibt er auch aus.

Dieser Block bietet den Vorteil, daß für An- und Ausschaltvorgänge nicht ein einziger Wert vorgegeben wird, so daß ein ständiges An- und Ausschalten vermieden wird. Dieses Verhalten gibt den realen Betrieb besser wieder.

Rücklaufschlamm-Steuerung

Ähnlich dem Umschalter bei der O_2 -Regelung (s. Abbildung 8-6) läßt sich auch ein Schalter für den Rücklaufschlamm entwerfen (s. Abbildung 8-8). Damit kann der Rücklaufschlamm wahlweise konstant oder in Abhängigkeit vom Zulauf eingestellt werden.

Bei zulaufabhängiger Regelung wird die Wassermenge im Zulauf mit dem Rücklaufverhältnis multipliziert (Produkt-Block: Simulink => Linear). Über den Switch kann gewählt werden, ob die Rezirkulation konstant oder geregelt sein soll. Der Saturation-Block (Simulink => Nonlinear) gibt eine obere Grenze vor (z. B. maximale Pumpenleistung).

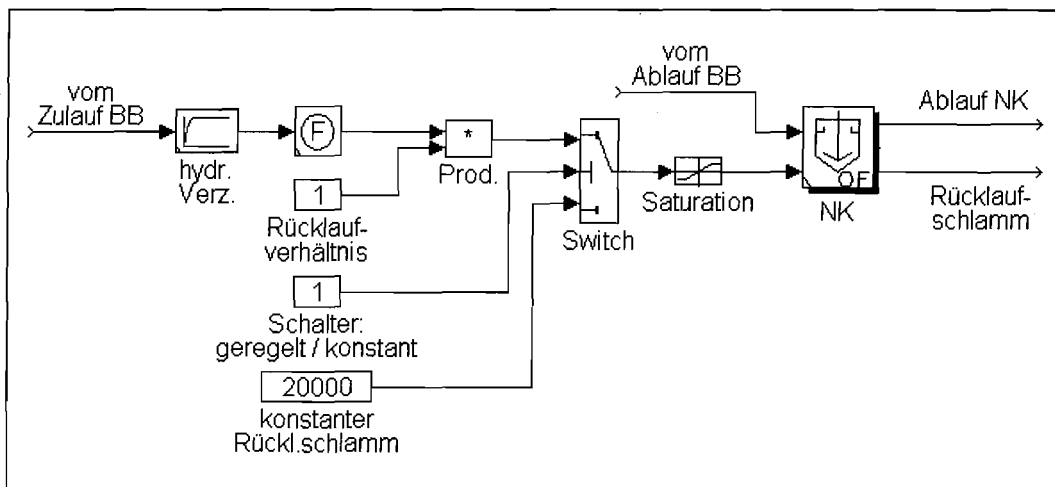


Abbildung 8-8: Rücklaufschlammregler

Überschußschlammregler

Zur Simulation des Überschußschlammabzugs kann der Repeating-Sequence-Block genutzt werden (Simulink => Sources). In diesem Block kann vorgegeben werden, wann Überschußschlamm gezogen werden soll und wann der Schlammabzug beendet wird. Bei Stellung auf Schlammabzug wird die vorgegebene Überschußschlammmenge im Prod.-Block mit "1" multipliziert, sonst mit "0".

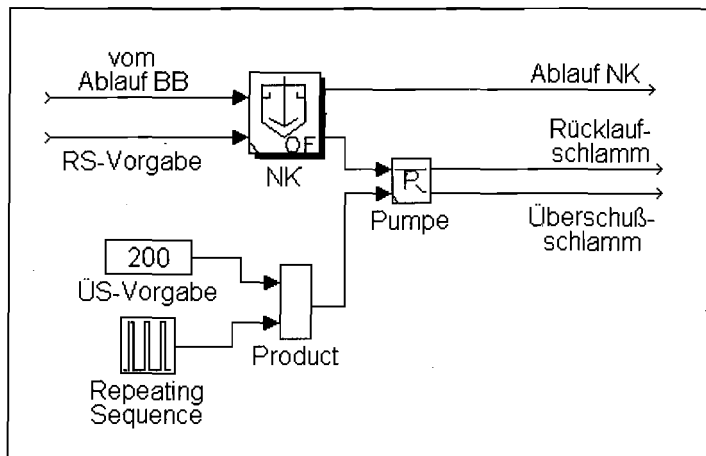


Abbildung 8-9: Überschußschlammregler

Rezirkulationsregler

Im folgenden wird ein Beispiel für eine Rezirkulationsregelung in Abhängigkeit von der $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentration im Ablauf der Denitrifikationszone vorgestellt (s. Abbildung 8-10). Bei diesem Regler wird die Differenz aus dem Nitratwert im Ablauf der Denitrifikationszone und einem Vorgabewert gebildet und anschließend mit einer Verstärkungsfaktor multipliziert. Die Verstärkungsfaktor gibt die Intensität des Regelungseingriffes vor (vgl. Sauerstoffregelung).

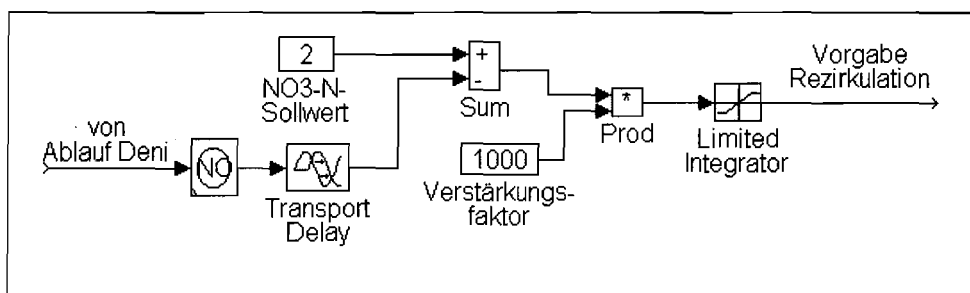


Abbildung 8-10: Rezirkulationsregler

Bei der NO_3 -Messung auf einer realen Anlage können die Analyseergebnisse erst zeitverzögert (Transportleitung, Analyse) ausgegeben werden. Um diesen Zeitverzug zu berücksichtigen, kann ein Transport-Delay (Simulink => Nonlinear) vorgeschaltet werden. Diese Blöcke bewirken eine zeitliche Verschiebung des Ausgangssignals.

Werden einzelne Belebungsbecken als variable Deni-/Nitribecken betrieben, so variiert auch die Stelle, an der der NO_3 -Wert gemessen werden muß. Für den fortgeschrittenen Nutzer ist in Abbildung 8-11 ein Beispiel für einen Nitrat-Meßbaustein, der im Ablauf der aktuell eingestellten Denitrifikationszone mißt, zu finden. Nitrat wird dort an drei Stellen gemessen: Im Ablauf der ständigen Denitrifikationszone (Eingang 1) und im Ablauf der

beiden variablen Deni-/Nitribecken (Eingänge 2 und 4). An den Eingängen 3 und 5 wird gemessen, ob in die variablen Becken Luft eingetragen wird.

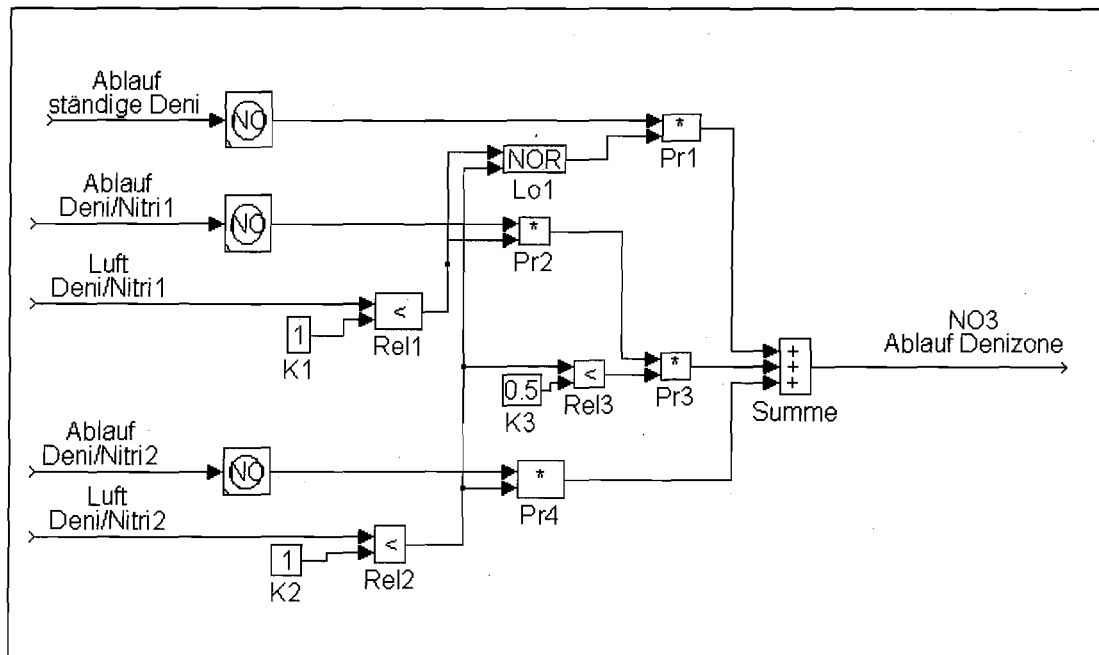


Abbildung 8-11: Messung der $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentration im Ablauf einer variablen Denitrifikationszone

Durch die anschließenden logischen Verknüpfungen kann nur der Nitratlauf-Meßwert des Beckens zum Summen-Block gelangen, der im Ablauf der Denitrifikationszone liegt. Der Weg soll beispielhaft für den Fall erklärt werden, daß beide variablen Becken nicht belüftet werden:

Da keine Luft eingeblasen wird, sind die Eingänge 3 und 5 jeweils "Null". Die Ausgänge des Relational-Operators (Rel1 und Rel2) ist daher "Eins" ("Null" aus Eingangssignal < "Eins" aus der Konstante). Aus dem Logical-Operator Lo1 (NOR) wird für diesen Fall eine "Null" ausgegeben, d.h. der Nitratwert der ständigen Denitrifikationszone wird mit "Null" multipliziert (Pr1).

Der Nitratwert der ersten variablen Deni-/Nitrizone wird zunächst mit "Eins" (aus dem Rel1) multipliziert (Pr2). Bei Pr3 wird er jedoch auch mit "Null" multipliziert, da aus dem Rel3 eine "Null" kommt.

Übrig bleibt daher nur noch der Meßwert der Meßstelle im Ablauf der zweiten Deni-/Nitrizone. Im Summenblock werden damit zwei "Nullen" und der Meßwert aus dem Ablauf der Denizone addiert.

9 Ausblick und zukünftige Entwicklungen

Die dynamische Simulation von Abwasserbehandlungsanlagen läßt zukünftig Entwicklungen in mehrfacher Hinsicht erwarten. Dies betrifft zum einen ihren Einsatzbereich: Zur Zeit sind es vor allen Dingen Forschungseinrichtungen, die mit der dynamischen Simulation arbeiten und sich insbesondere mit der Weiterentwicklung dieses Werkzeugs beschäftigen. Zunehmend wird die dynamische Simulation aber auch von Hochschulinstituten und Ingenieurbüros zur Optimierung von Kläranlagen oder zur Entwicklung von Ausbaukonzepten eingesetzt. Diese Entwicklung von der Forschung zur Anwendung in der Praxis soll mit diesem Hinweispapier unterstützt werden. Ein weiterer Bereich, in dem die dynamische Simulation zunehmend an Bedeutung gewinnt, ist die On-line-Simulation zur Betriebsunterstützung von Kläranlagen [Freund 1996]. Diese zur Zeit noch im Erprobungsstadium befindliche Einsatzweise kann einen großen Beitrag zur Erhöhung der Betriebssicherheit und vor allen Dingen zu einem besseren Prozeßverständnis beim Betriebspersonal einer Anlage leisten.

Ein weiterer Aspekt der Weiterentwicklung der Simulation ist die Verbesserung der vorhandenen Modelle. Hier steht, was das Belebungsverfahren betrifft, vor allem die Einbeziehung der Phosphorelimination im Vordergrund. Aber auch für die Modellierung der Absatzvorgänge in Vor- und Nachklärung sind in Zukunft mit zunehmendem Prozeßverständnis Verbesserungen zu erwarten.

Die dynamische Simulation ist zur Zeit noch auf das Belebungsverfahren beschränkt. Eine breitere Anwendung auf andere Behandlungsverfahren und angrenzende Bereiche der Siedlungswasserwirtschaft ist jedoch bereits absehbar und teilweise schon realisiert. Hier sind vor allen Dingen die Simulation von Biofilmverfahren und von Sequencing-Batch-Reaktoren sowie die Modellierung von A-Stufen und somit zweistufigen Kläranlagen zu nennen. Mit Hilfe der dynamischen Simulation wird es in Zukunft auch möglich sein, das Zusammenwirken von Kanalnetz und Kläranlage zu erfassen. Entsprechende Blöcke sind teilweise bereits in SIMBA implementiert.

Wie aus den vorangegangenen Abschnitten zu ersehen, ist auch die dynamische Simulation einem dynamischen Prozeß unterworfen. Es ist daher unmöglich, dieses Thema umfassend und abschließend zu behandeln. Mit diesem Papier ist es hoffentlich gelungen, einen Überblick über die Grundlagen der dynamischen Simulation und ihre Anwendungs-

möglichkeiten zu geben, das sowohl den Anwender mit seinen konkreten Fragen, als auch den, der eine Simulationsstudie zu beurteilen hat, unterstützen kann.

9.1 Adressen

Ansprechpartner für weitere Fragen und Anregungen sind unter den folgenden Adressen zu finden:

Dipl.- Ing. Anne Sintic
Dipl.- Ing. Thomas Rolfs
Dipl.- Ing. Carsten Owerdieck
Institut für Siedlungswasserwirtschaft
RWTH Aachen
52056 Aachen
Fon: 02 41 / 80 - 3971
Fax: 02 41 / 88 88 285

Dr.- Ing. Hans- Peter Buysch
Dipl.- Ing. Kerstin Menn
Landesumweltamt NRW
Postfach 10 23 63
45023 Essen
Fon: 02 01 / 7995 - 2532
02 01 / 7995 - 2511
Fax: 02 01 / 7995 - 2500

Dipl.- Ing. Martin Freund
Lippe Gesellschaft für Wassertechnik
Kronprinzenstr. 24
45128 Essen
Fon: 02 01 / 104 - 28 46
Fax: 02 01 / 104 - 24 40

Dr.- Ing. Jörg Londong
Wupperverband
Zur Schafbrücke 6
42283 Wuppertal
Fon: 02 02 / 5 83 - 2 39
Fax: 02 02 / 5 83 - 3 03

Dr.- Ing. Andreas Stein
Emschergenossenschaft / Lippeverband
Kronprinzenstr. 24
45128 Essen
Fon: 02 01 / 104 - 24 19
Fax: 02 01 / 104 - 28 00

10 Literatur

- ATV-Arbeitsbericht AG 2.11.4 "Simulation von Kläranlagen"**, Korrespondenz Abwasser, 11/1997
- Bornemann, C., Freund, M., Londong, J., Nowak, O., Otterpohl, R., Rolfs, T.**, Hinweise zur dynamischen Simulation von Belebungsanlagen mit dem Belebtschlammmodell Nr.1 der IAWQ, Korrespondenz Abwasser, 3/1998
- Freund, M., Fruhen-Hornig, M.**, Erfahrungen mit dem Einsatz eines dynamischen Simulationsmodells zur Unterstützung des Betriebs der Kläranlage Köln-Stammheim, 14. Bochumer Workshop Siedlungswasserwirtschaft, Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft und Umwelttechnik, Ruhr-Universität Bochum, September 1996
- Henze, M., Grady, C.P.L., Gujer, W., Marais, G.v.R., Matsuo, T.**, The Activated Sludge Model No. 1, Scientific and Technical Reports, Task group on mathematical modelling for design and operation of biological wastewater treatment, London, 1987
- Henze, M., Gujer, W., Mino, T., Matsuo, T., Wentzel, M.C., Marais, G.v.R.**, The Activated Sludge Model No. 2, Scientific and Technical Reports, Task group on mathematical modelling for design and operation of biological wastewater treatment, pp. 1 - 9.3 London, 1994
- Liebeskind, M.**, Ermittlung von praxisgerechten Versuchskombinationen zur reproduzierbaren Bestimmung von Parametersätzen für die Simulation von Abwasserreinigungsanlagen, Abschlußbericht eines Forschungsvorhabens am Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen, Kennzeichen 509/90, 1994, Oswald-Schulze-Stiftung, Gladbeck,
- LUA NRW**, Hinweise für die Bemessung von Belebungsanlagen mit dem Programm ARABER (Version 4.0), Merkblatt Nr.13, 1998
- Otterpohl, R., Raak, M., Rolfs, T.**, A Mathematical Model for the Efficiency of the Primary Clarification. Proceedings of IAWQ 17th Biennial Int. Conference, Budapest Hungary, 1994
- Otterpohl, R., Freund, M.**, Dynamic Models for Clarifiers of Activated Sludge Plants with Dry and Weather Flows. Water Science and Technology, Vol. 26, 1992, No 5 - 6, pp 1391 - 1400
- Takacs, G., Patry, G. G. , Nolasco, D.**, A Dynamic Model of the Clarification-Thickening Processes, Wat. Res. Vol. 25 (1987), No. 10, pp. 1263 - 1271
- Van Loosdrecht, M. C. M. , Van der Meij, J. , Heijnen, J. J.**, A Structured Metabolic Model for the Anaerobic and Aerobic Stoichiometry and Kinetics of the Biological Phosphorus Removal Process, Biotechnology and Bioengineering, Vol. 47, No.3, 1995

Seit 1. April 1994 sind bisher folgende Merkblätter im Landesumweltamt NRW erschienen:

1	Bestimmung von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) in Bodenproben	15,00 DM
2	Betrieb und Unterhaltung von mechanisch-biologischen Kläranlagen	15,00 DM
3	Abwasserbeseitigung im Außenbereich (Kleinkläranlagen)	15,00 DM
4	Leitfaden für die Abwicklung der Luftreinhalteplanung in NRW	15,00 DM
5	Leitfaden für die Vorgehensweise bei akuten Dioxin-Schadensfällen	15,00 DM
6	Bestimmung von 6 polychlorierten Biphenylen (PCB) in Böden, Schlämmen, Sedimenten und Abfällen	15,00 DM
7	Anforderungen an die Verwendung von Stahlwerksschlacken im Wasserbau	15,00 DM
8	Anforderungen an biologische Bodenbehandlungsanlagen nach dem Mietenverfahren	20,00 DM
9	Anforderungen an Sachverständige bei der Bearbeitung von Altlasten (Stand Juli 1997)	15,00 DM
10	Geräuschimmissionsprognose von Sport- und Freizeitanlagen – Berechnungshilfen –	15,00 DM
11	Richtlinie – Schnittstellenspezifikation für die Vorlage von Betriebskenndaten bei der nach § 3 Abs. 1 zuständigen Behörde gemäß Deponieselbstüberwachungsverordnung	30,00 DM
12	Merkblatt zur Anwendung der TA Siedlungsabfall bei Deponien	30,00 DM
13	Bemessung kommunaler Kläranlagen – Hinweise für die Bemessung von Belebungsanlagen mit dem Programm ARA-BER (Version 4.0)	15,00 DM
14	Gewässerstrukturgüte in Nordrhein-Westfalen Kartieranleitung	30,00 DM
15	Simulation kommunaler Kläranlagen – Hinweise zur Anwendung der dynamischen Simulation am Beispiel von SIMBA® –	20,00 DM

Vertrieb: Landesumweltamt NRW • Postfach 102 363 • 45023 Essen
