

**Überarbeiteter Kurzbericht
zum Forschungsvorhaben:**

**„Dynamische Simulation von Tropfkörpern
kommunaler Kläranlagen“**

AZ IV-9-042 166

für das



Bearbeitung: Dipl.-Ing. Patrick Höhn

Projektleiter:

Aachen, den 20.04.2005

ISA RWTH Aachen



.....
Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Pinnekamp

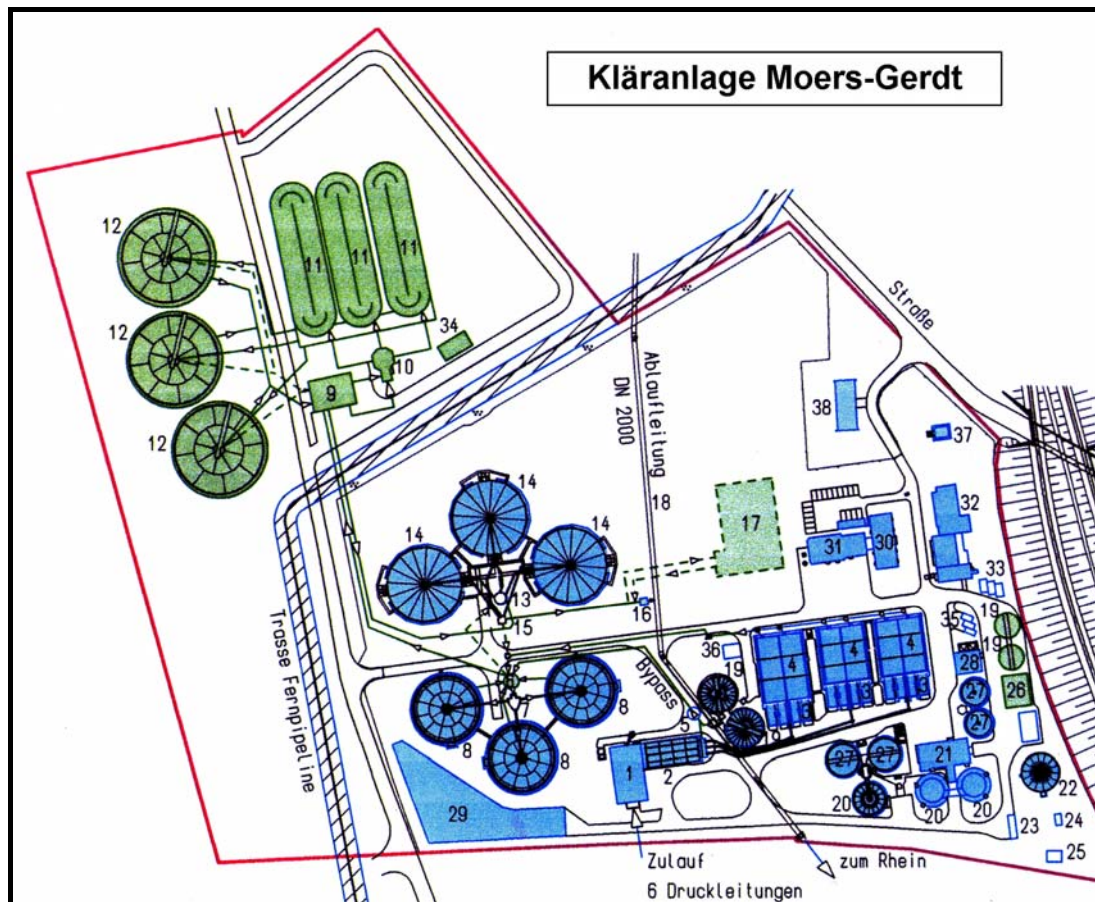
1 Veranlassung

Das Tropfkörperverfahren zählt zu den ältesten biologischen Verfahren der Abwasserreinigung. Es wurde neben der Anwendung als alleinige biologische Reinigungsstufe in der Vergangenheit auch oft in Kombination mit einer Belebungsstufe eingesetzt. Trotz ihrer vormals weiten Verbreitung ist die Anzahl der betriebenen Tropfkörperanlagen in Nordrhein-Westfalen in den letzten Jahren stetig zurückgegangen [MUNLV 2003]. Aus volkswirtschaftlicher Sicht erscheint es aber sinnvoll zu prüfen, ob bei Anlagen, die sowohl über eine Belebungsstufe als auch Tropfkörper verfügen, letztere in den Reinigungsprozess effektiv eingebunden und somit Ausbaurkosten reduziert werden können. Die Ermittlung einer bestmöglichen Integration der Tropfkörper in den Prozess der biologischen Abwasserreinigung sowie eine optimierte Betriebsstrategie erfordern i.d.R. zeit- und kostenintensive Untersuchungen. Alternativ kann auf die dynamische Simulation zurückgegriffen werden. Während Modelle, mit denen die biologischen Vorgänge im Belebungsbecken nachgebildet werden, seit Jahren erprobt sind, befindet sich die Simulation von Biofilmanlagen, zu denen auch Tropfkörperanlagen zählen, noch in der Entwicklungsphase. In früheren Forschungsvorhaben am Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen wurde bereits ein Biofilmmodell entwickelt und für die Simulation von überstauten Festbettreaktoren erweitert und optimiert. Für die dynamische Simulation von Tropfkörperanlagen mit diesem Modell liegen noch keine praktischen Erfahrungen vor.

2 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Ziel des vom Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV) geförderten Forschungsvorhabens „Dynamische Simulation von Tropfkörpern kommunaler Kläranlagen“ war, auf Basis der bislang vorliegenden Ansätze ein Tropfkörpermodell zu entwickeln und zum Nachweis seiner Übertragbarkeit auf einer Kläranlage anzuwenden. Weiterhin sollte untersucht werden, wie sich bei mehrstufigen Anlagen

durch unterschiedliche Verfahrensführung Tropfkörperanlagen möglichst effektiv in den Prozess der biologischen Abwasserreinigung integrieren lassen.



- | | | | |
|----|--------------------------------------|----|---|
| 1 | Einlaufgebäude mit Rechen | 20 | Faulbehälter |
| 2 | Sandfang | 21 | Maschinenhaus 1 |
| 3 | Hochlastbelebung | 22 | Faulgasbehälter |
| 4 | Zwischenklärung 1 | 23 | Propangasbehälter |
| 5 | Bypass-Schacht | 24 | Gasdruckerhöhungsstation |
| 6 | Sonderschacht 1 | 25 | Gasfackel |
| 7 | Bypass um die Zwischenklärung 2 | 26 | Maschinelle Überschussschlammeindickung |
| 8 | Verteilerbauwerk Zwischenklärung | 27 | Stapelbehälter |
| 9 | Maschinenhaus 2 | 28 | Schlammentwässerungsgebäude |
| 10 | Verteilerbauwerk Schwachbelastung | 29 | Schlammagerplatz |
| 11 | Schwachlastbelebung | 30 | Betriebsgebäude |
| 12 | Nachklärung | 31 | Fahrzeughalle |
| 13 | Verteilerbauwerk Tropfkörper | 32 | Zentrallabor |
| 14 | Tropfkörper | 33 | Gefahrstofflager |
| 15 | Sonderschacht 2 – Tropfkörper/Bypass | 34 | Substratlager |
| 16 | Ablaufmessstation | 35 | Garagen |
| 17 | Filtration, späterer Ausbau | 36 | Maschinenhaus 3 |
| 18 | Ablaufkanal Rhein | 37 | Betriebswasseranlage |
| 19 | Eindicker | 38 | Wohnhaus |

Bild 1: Lageplan der Kläranlage Moers-Gerdt

Für die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens vorgesehenen Untersuchungen wurde die Kläranlage Moers-Gerdt der Linksniederrheinischen Entwässerungs-Genossenschaft (LINEG) ausgewählt. Die Anlage verfügt über eine Hochlast- und eine Schwachlastbelebungsstufe ($V = 28.000 \text{ m}^3$) sowie über drei Tropfkörper ($V = 11.400 \text{ m}^3$), die in den Gesamtreinigungsprozess integriert werden sollen (s. Bild 1).

Verbunden mit diesen Untersuchungen war die Überprüfung, ob mit der vorhandenen Anlagensubstanz eine sichere Einhaltung der geforderten Überwachungswerte für $N_{\text{gesamt}} = 13 \text{ mg/l}$ gemäß Abwasserverordnung Anlage 1 (Stand 2002) für eine Anschlussgröße von 250.000 E möglich ist.

3 Vorgehensweise

Die Vorgehensweise bei der Bearbeitung des Forschungsvorhabens stellte sich wie folgt dar:

1. Durchführung von mehreren Intensivmessphasen
2. Aufbau eines Simulationsmodells der Anlage
3. Kalibrierung und Validierung der Schwachbelastungsstufe
4. Kalibrierung und Sensitivitätsanalyse der Tropfkörper
5. Variantenuntersuchungen zur Ermittlung der optimalen Einbindung der Tropfkörper in den Gesamtreinigungsprozess und der Leistungsreserven

Für die dynamische Simulation wurde eine Modellanlage der Kläranlage Moers-Gerdt mit dem Programm SIMBA erstellt (s. Bild 2). Das Simulationsmodell beschränkte sich auf die Abbildung der Schwachlastbelebungsstufe, der Nachklärung und der Tropfkörper, da hier der Schwerpunkt der Untersuchungen lag. Für die Beschreibung der Umsetzungsprozesse in der Schwachlastbelebungsstufe wurde das Activated Sludge Model No. 3 gewählt. Die Beschreibung der Umsetzungsprozesse in den Tropfkörpern erfolgte mit einem Biofilm-Modellansatz. Dieser Ansatz basierte auf dem Activated Sludge Model No. 1.

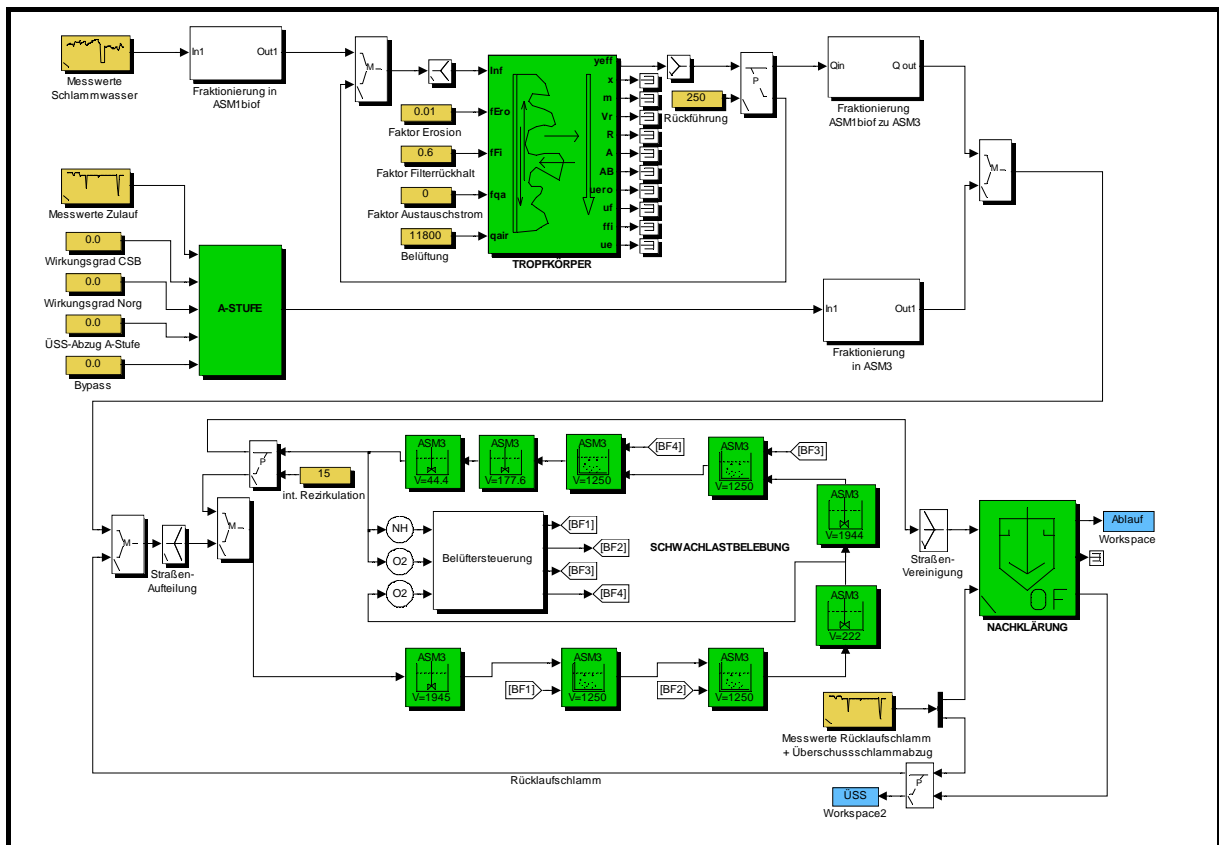


Bild 2: Simulationsmodell der Kläranlage Moers-Gerdt

Die Datengrundlage für die Kalibrierung der Modelle für die Schwachlastbelebungsstufe und die Tropfkörper bildeten zwei Intensivmessphasen, die im September 2001 und im April 2002 auf der Kläranlage Moers-Gerdt durchgeführt wurden. Während der ersten Messphase waren die Tropfkörper nicht in Betrieb, wurden jedoch wenige Monate danach in den Reinigungsbetrieb integriert. Zum Zeitpunkt der zweiten Messphase erfolgte eine Beschickung von zwei der drei Tropfkörper mit allen Schlammwässern mit dem Ziel einer Nitrifikation dieser. Zur Ermittlung einer bestmöglichen Integration der Tropfkörper in den Gesamtreinigungsprozess wurden verschiedene mit der LINEG abgestimmte Varianten mittels der dynamischen Simulation untersucht:

- Variante 0: Keine Einbindung der Tropfkörper (Referenzsimulation)
- Variante 1: Nitrifikation eines Abwasserteilstroms (20 %)
- Variante 2: Nitrifikation und Denitrifikation eines Abwasserteilstroms (20 %)
- Variante 3: Nitrifikation der Schlammwässer
- Variante 4: Nitrifikation und Denitrifikation der Schlammwässer

Die Variantensimulationen wurden für zwei unterschiedliche Lastfälle durchgeführt. Diese Lastfälle entsprachen dem aktuellen Belastungszustand (185.000 E) bzw. dem Ausbauzustand (250.000 E). Als maßgebende Belastungen wurden die 90%-Perzentile des Jahres 2002 angesetzt [siehe auch Buer et al. 2002]. Für die Simulationen des Ausbauzustandes wurden die Belastungen proportional hochgerechnet.

4 Ergebnisse

4.1 Kalibrierung der Modellanlage

Die Ergebnisse der dynamischen Simulation für die 1. Intensivmessphase zeigten eine gute Wiedergabe der gemessenen Konzentrationsverläufe für Ammonium und Nitrat (s. Bild 3). Einzig die infolge der Zu- und Abschaltung einzelner Belüfterfelder auftretenden Konzentrationsschwankungen für den Parameter Stickstoff waren in der Simulation nicht in der gleichen Ausprägung reproduzierbar.

Für die zweite Intensivmessphase konnte hinsichtlich der Abbildung der Ammonium- und Nitrat-Konzentrationen im Vergleich zur ersten Messphase noch einmal eine Steigerung der Qualität des Modellabgleichs erreicht werden (s. Bild 4). Die durch die Belüftersteuerung erzeugten Schwankungen der Stickstoff-Ablaufkonzentrationen ($\text{NH}_4\text{-N}$ und $\text{NO}_3\text{-N}$) konnten für diese Messphase in der Simulation hinsichtlich der Größe des Amplitudenmaßes und der Dynamik deutlich besser nachgebildet werden.

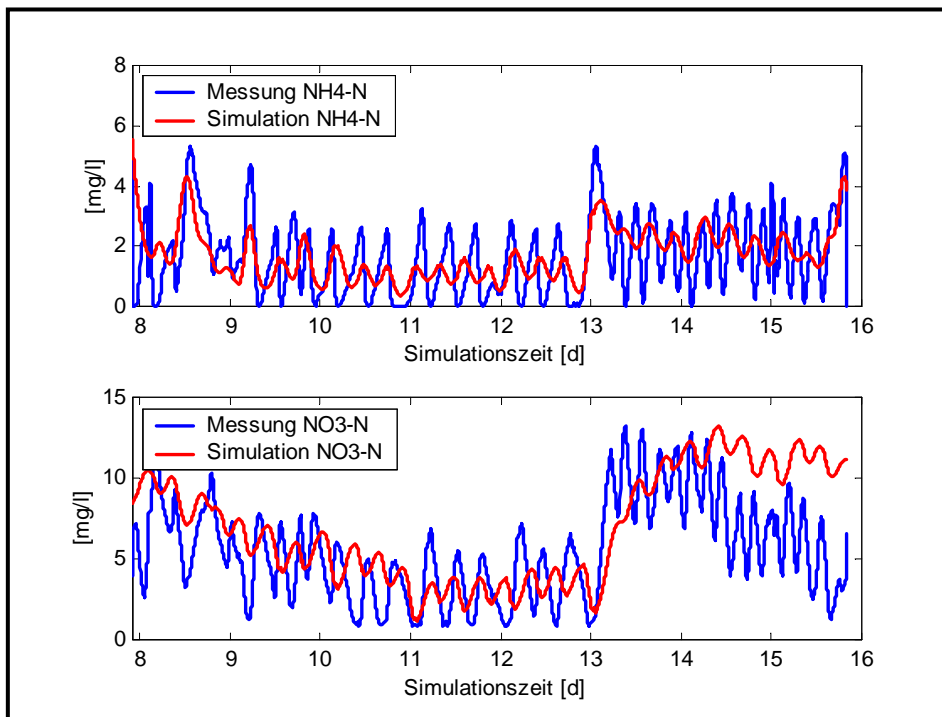


Bild 3: 1. Messphase: Simulierte und gemessene Ablaufkonzentrationen für NH₄-N und NO₃-N

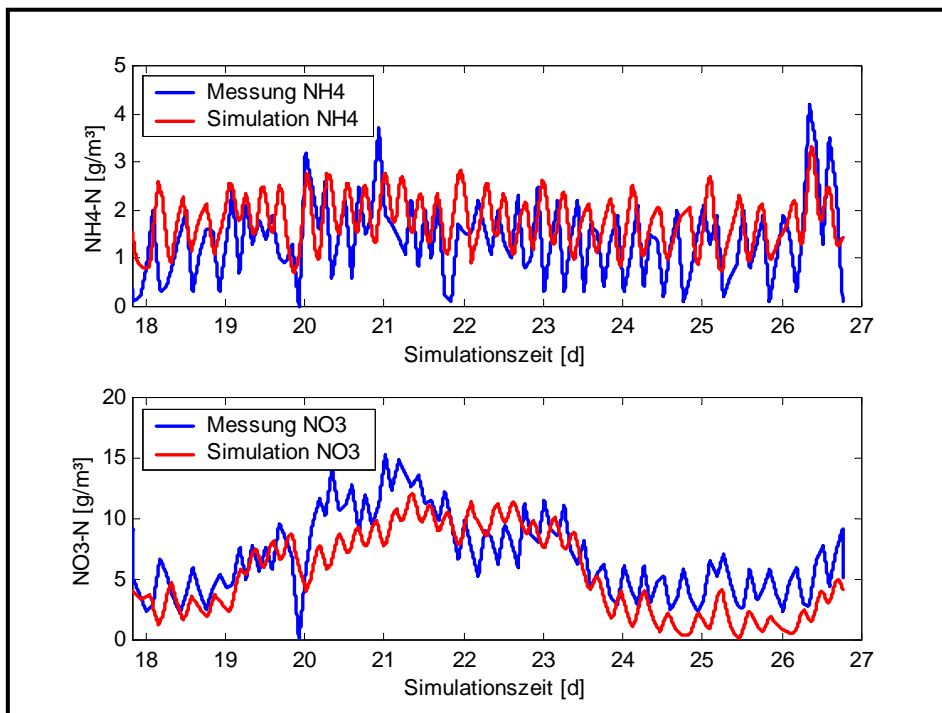


Bild 4: 2. Messphase: Simulierte und gemessene Ablaufkonzentrationen für NH₄-N und NO₃-N

4.2 Kalibrierung des Tropfkörpermoduls

Im Zu- und Ablauf der Tropfkörper wurden während der zweiten Intensivmessphase 2-Stunden-Mischproben gezogen, die auf $\text{NH}_4\text{-N}$, TKN, $\text{CSB}_{\text{homogenisiert}}$ und $\text{CSB}_{\text{filtriert}}$ analysiert wurden. In der Simulation konnten die gemessenen Ganglinien der Konzentrationen insgesamt mit einer ausreichenden Genauigkeit wiedergegeben werden (s. Bild 5).

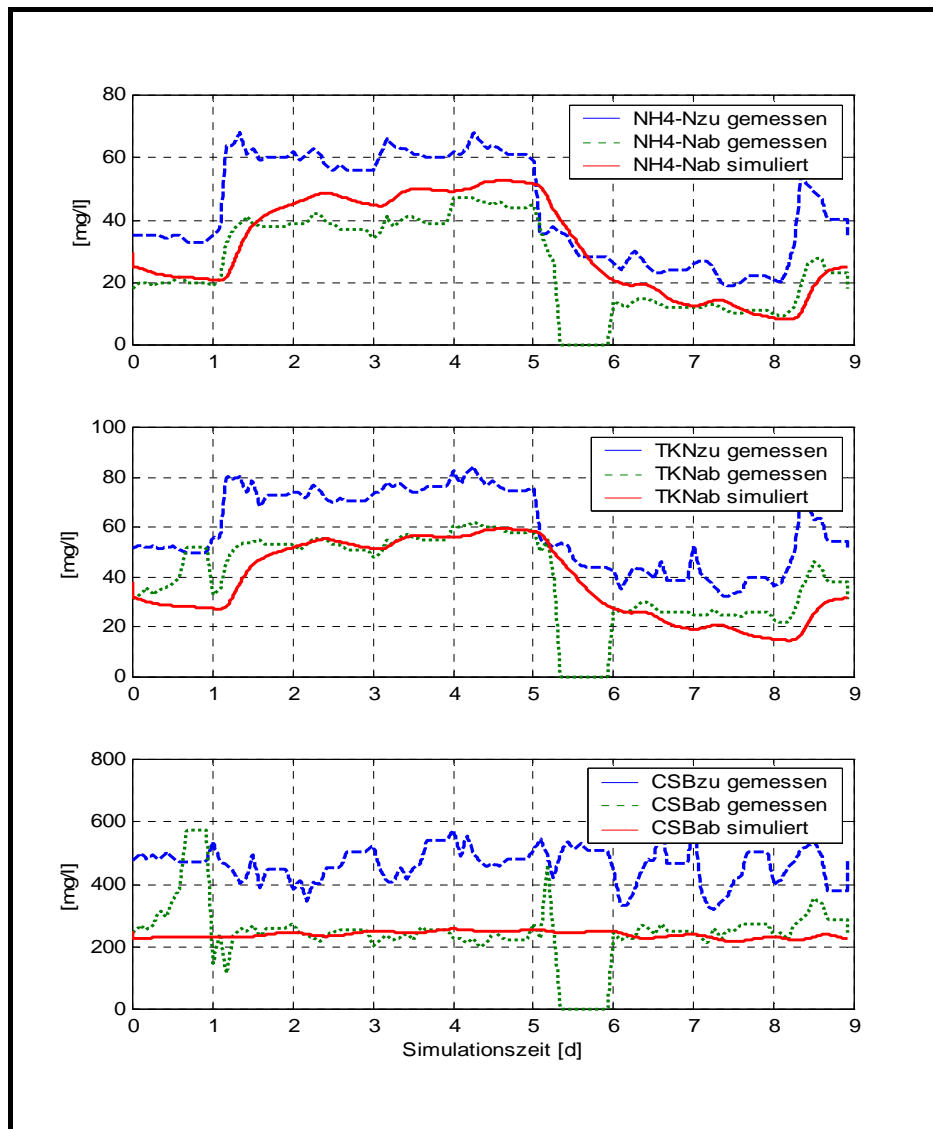


Bild 5: Simulierte und gemessene Ammonium-, TKN-, und CSB-Konzentrationen im Zu- und Ablauf Tropfkörper

Aufgrund des erfolgreichen Modellabgleichs wurde die Schlussfolgerung gezogen, dass das vorliegende Biofilmmodell für die dynamische Simulation von Tropfkörpern geeignet ist.

4.3 Sensitivitätsanalyse des Tropfkörpermoduls

Ziel der Sensitivitätsanalyse des Tropfkörpermoduls war die Ermittlung derjenigen Parameter, die bei einer Variation Auswirkungen auf die Reinigungsleistung des Tropfkörpers haben. Hierfür wurden die folgenden Parameter variiert:

- Erosionsfaktor
- Filterrückhalt
- Anzahl der Reaktorschichten
- Belüftungsmenge
- Temperatur
- Rezirkulation
- Raumbelastung
- Verhältnis $CSB_{\text{inert}}/CSB_{\text{ges}}$

Die Sensitivitätsanalyse veranschaulichte, dass bereits die Variation eines einzigen Parameters zu erhebliche Veränderungen der TKN- und CSB-Ablaufkonzentrationen führen kann. Am sensitivsten waren dabei die in den Tropfkörper eingetragene Luftmenge, die Raumbelastung sowie der Anteil des inerten bzw. organisch abbaubaren CSB am $CSB_{\text{homogenisiert}}$ (s. Bild 6). Der Anteil des inerten bzw. organisch abbaubaren CSB am $CSB_{\text{homogenisiert}}$ wird in der Simulation durch die jeweilige Fraktionierung des Zuflusses festgelegt. Ebenfalls Auswirkungen auf die Reinigungsleistung hatten der Erosionsfaktor und die Rezirkulationsmenge, zumindest bei sehr geringen Werten bzw. Mengen. Nur geringe Auswirkungen auf die Ablaufkonzentrationen traten hingegen bei einer Veränderung des Filterrückhalts, der Temperatur und der Anzahl der Reaktorschichten ab einer Schichtenanzahl von 3 (ohne Abbildung) auf.

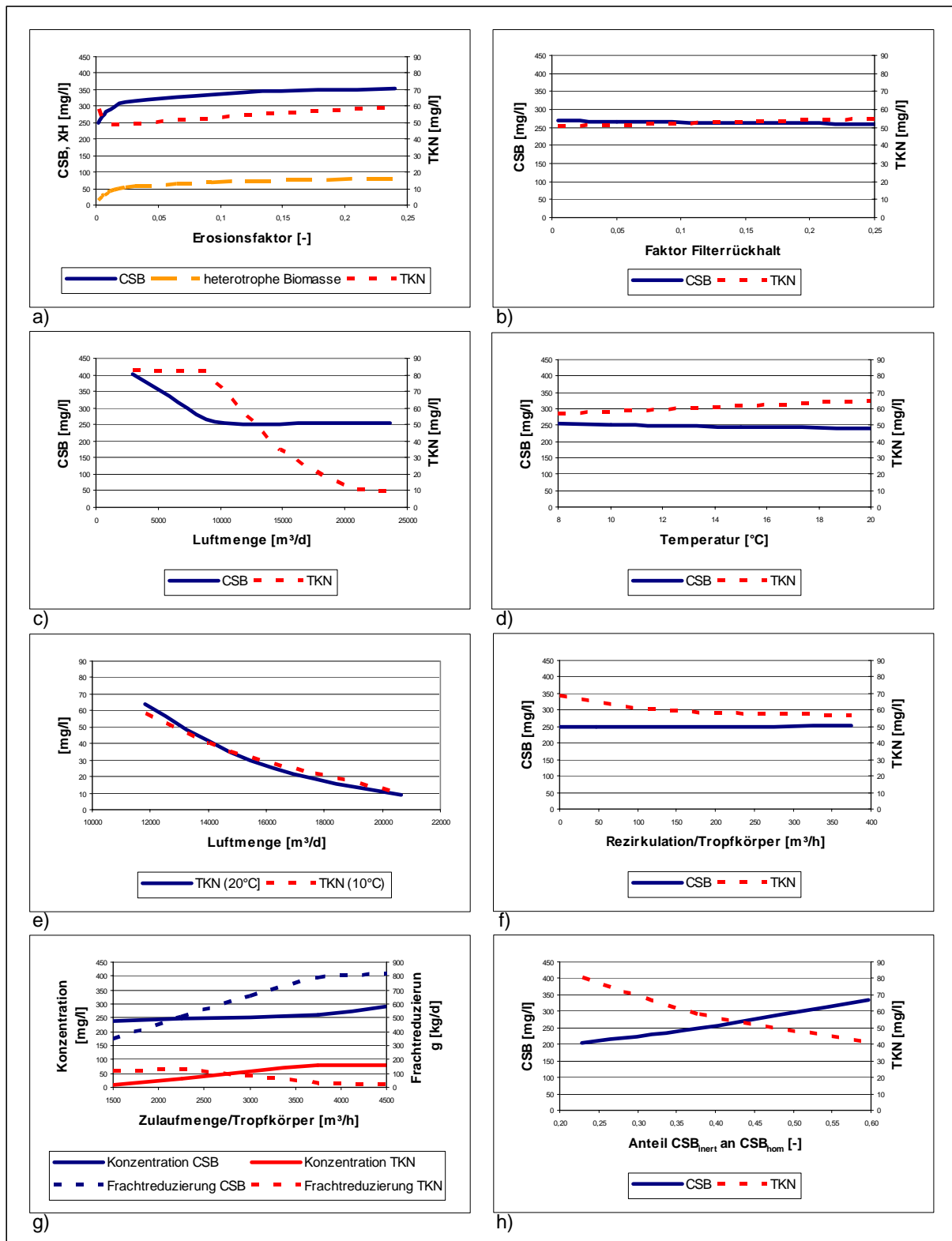


Bild 6: Sensitivität von a) Erosionsfaktors, b) Filtrerrückhalt, c) Belüftungsmenge, d) Temperatur, e) Luftmenge und Temperatur, f) Rezirkulationsmenge, g) Raumbelastung und h) CSB-Fraktionierung bezüglich CSB und TKN

4.4 Variantenuntersuchungen

Ziel der Variantenuntersuchungen war eine möglichst effektive Integration der Tropfkörper in den Gesamtreinigungsprozess verbunden mit einer Ermittlung der vorhandenen Leistungsreserven bei Ansatz der maßgebenden Belastungen im aktuellen (Lastfall 185.000 E) und Endausbauzustand (Lastfall 250.000 E). Als maßgebende Belastungen für den aktuellen Ausbaugrad wurden die 90%-Perzentile des Abwasserzuflusses aus dem Jahr 2002 angesetzt. Die für den Lastfall 250.000 E maßgeblichen Belastungen ergaben sich über eine Erhöhung der für den Lastfall 185.000 E ermittelten Zuflussvolumenströme und Frachten um rund 35 %. In Tabelle 1 sind die für die beiden untersuchten Lastfälle angesetzten Belastungen aufgeführt.

Tabelle 1: Maßgebende Belastungen für Lastfall 185.000 E und Lastfall 250.000 E

Parameter	Einheit	Lastfall 185.000 E	Lastfall 250.000 E
Q_d	[m ³ /d]	37.016	50.021
Fracht N_{ges}	[kg/d]	1.696	2.292
Fracht NH_4-N	[kg/d]	1.187	1.604
Fracht N_{org}	[kg/d]	509	688
Fracht CSB	[kg/d]	24.426	33.008

Die Belastungen im Ablauf der Zwischenklärung II liegen jedoch deutlich niedriger, da in der A-Stufe ein Abbau von CSB und organischen Stickstoff sowie eine Entnahme von Überschussschlamm stattfindet. Die Wirkungsgrade der A-Stufe wurden wie folgt angenommen [Buer et al. 2002]:

$$\eta_{CSB} = 47 \%$$

$$\eta_{NH_4-N} = 0 \%$$

$$\eta_{N_{org.}} = 44 \%$$

Für die Schlammwässer wurde in den Variantenuntersuchungen ein konstanter Volumenstrom- und Frachtanfall angenommen (s. Tabelle 2).

Tabelle 2: Mengen und –frachten der Schlammwässer für Lastfall 185.000 E und 250.000 E

Parameter	Einheit	Lastfall 185.000 E	Lastfall 250.000 E
Q	[m ³ /d]	6.000	8.108
Fracht NH ₄ -N	[kg/d]	360	486
Fracht TKN	[kg/d]	510	689
Fracht CSB _{hom.}	[kg/d]	2.820	3.810

Die Auswahl eines charakteristischen Tagesganges erfolgte auf Basis der Messdaten der zweiten Intensivmessphase. Der TS-Gehalt in der Schwachlast-belebungsstufe wurde in der Simulation auf 3,1 g/l eingestellt, was dem durchschnittlichen TS-Gehalt des Jahres 2002 entsprach. Die Simulationen der Variantenuntersuchungen wurden für eine Abwassertemperatur von 10°C durchgeführt. Entsprechend der Anzahl der momentan auf der Kläranlage Moers-Gerdt in den Reinigungsprozess integrierten Tropfkörper wurden die Simulationen des Lastfalls 185.000 E mit zwei Tropfkörpern durchgeführt. Für den Planungszustand (Lastfall 250.000 E) ist ein Betrieb aller drei Tropfkörper vorgesehen.

Tabelle 3: TKN-Frachten im Zu- und Ablauf der Tropfkörper, Lastfall 250.000 E

TKN	Zulauf Tropfkörper	Ablauf Tropfkörper	Reduzierung Tropfkörper	Zulauf B-Stufe
	[kg/d]	[kg/d]	[kg/d]	[kg/d]
Variante 0	0	0	0	2.764
Variante 1	518	375	143	2.592
Variante 2	518	514	4	2.731
Variante 3	689	379	310	2.441
Variante 4	689	676	13	2.739

Die Simulationen für Lastfall 185.000 E und 250.000 E ergaben, dass eine Einbindung der Tropfkörper entsprechend Variante 3 bezüglich der Stickstoffkonzentrationen im Kläranlagenablauf am günstigsten war (s. Bild 7). Bei dieser Variante wurde die höchste Reduzierung der TKN-Fracht in den Tropfkörpern erreicht. Verbunden damit war eine Verbesserung des C/N-Verhältnisses im Zulauf zur B-Stufe. Die in den Tropfkörpern eliminierte TKN-Fracht differierte bei den einzelnen Varianten erheblich (s. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Bei den Varianten 2 und 4 fand nahezu keine Reduzierung der TKN-Fracht statt.

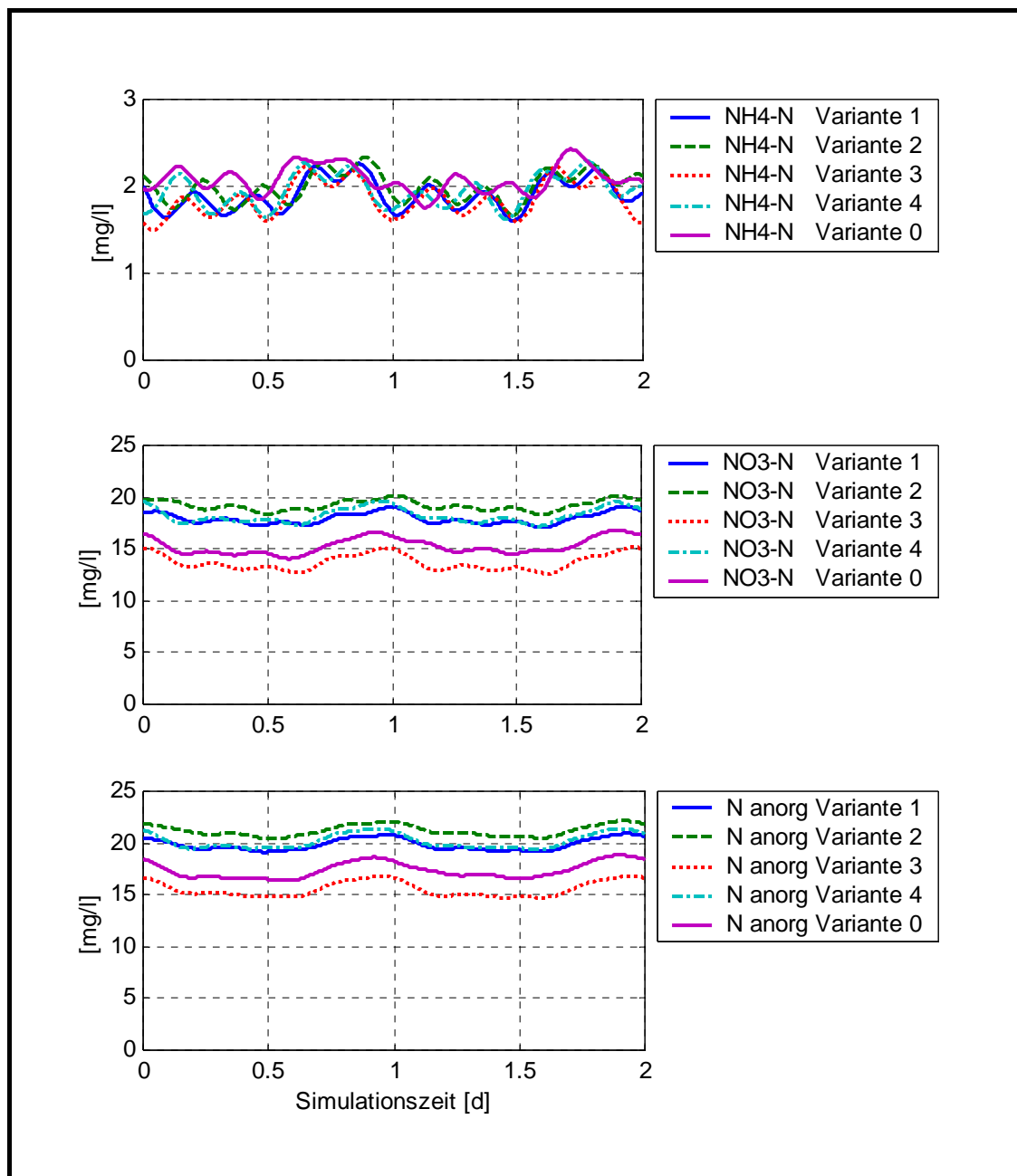


Bild 7: $\text{NH}_4\text{-N}$ -, $\text{NO}_3\text{-N}$ - und N_{anorg} -Konzentrationen für Variante 0 bis 4 ohne Bypass, Lastfall 250.000 E, Ablauf Nachklärung,

4.5 Ermittlung der vorhandenen Leistungsreserven für die Lastfälle 185.000 E und 250.000 E

Die Variantenuntersuchungen wurden zunächst ohne eine Bypassführung um die A-Stufe durchgeführt. Für die gewählten Belastungen wurde die geltende Überwachungskonzentration für N_{ges} im Kläranlagenablauf von 13 mg/l bei allen Varianten überschritten. Es zeigte sich, dass die Anlage zwar große Reserven bezüglich der Nitrifikation aufwies, die Denitrifikation in der B-Stufe jedoch kritisch zu beurteilen ist. Zur Steigerung der Denitrifikationsleistung in der B-Stufe und die Ermittlung der bei optimaler Betriebsweise verfügbaren Leistungsreserven der Anlage bezüglich der Stickstoffelimination wurden verschiedene betriebliche Maßnahmen untersucht:

- Bypassführung um die A-Stufe
- Erhöhung des TS-Gehaltes in der B-Stufe von 3,1 g/l auf 4,2 g/l
- Dosierung einer externen Kohlenstoffquelle
- Modifikation der Steuerung des Blendenregulierschiebers durch Veränderung der Sollwerte für $\text{NH}_4\text{-N}$ und Sauerstoff

Im Rahmen der Untersuchungen wurden unter dem Punkt „Modifikation der Steuerung des Blendenregulierschiebers“ nicht nur die Sollwerte für die Sauerstoff- und $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentrationen variiert, sondern auch ein alternatives Steuerungskonzept für die Blendenregulierschieber entwickelt. Die Auswirkungen auf die Ablaufkonzentrationen bei Anwendung dieses alternativen Steuerungskonzeptes waren vergleichbar mit den Auswirkungen bei einer Sollwertveränderung, weshalb in Bild 8 und Bild 9 nur die Ablaufkonzentrationen bei einer Veränderung der Sollwerte dargestellt sind. Die Ablaufkonzentrationen für N_{anorg} , die sich bei der Anwendung einer der oben genannten Maßnahmen ergaben, wurden den Ablaufkonzentrationen für N_{anorg} ohne zusätzliche Maßnahmen gegenübergestellt (s. Bild 8). Jede der oben genannten Maßnahmen führte zu einer Verringerung der Stickstoffkonzentrationen.

Eine deutliche Unterschreitung des Überwachungswertes für N_{anorg} von 13 mg/l war nur bei einer Dosierung einer externen Kohlenstoffquelle möglich.

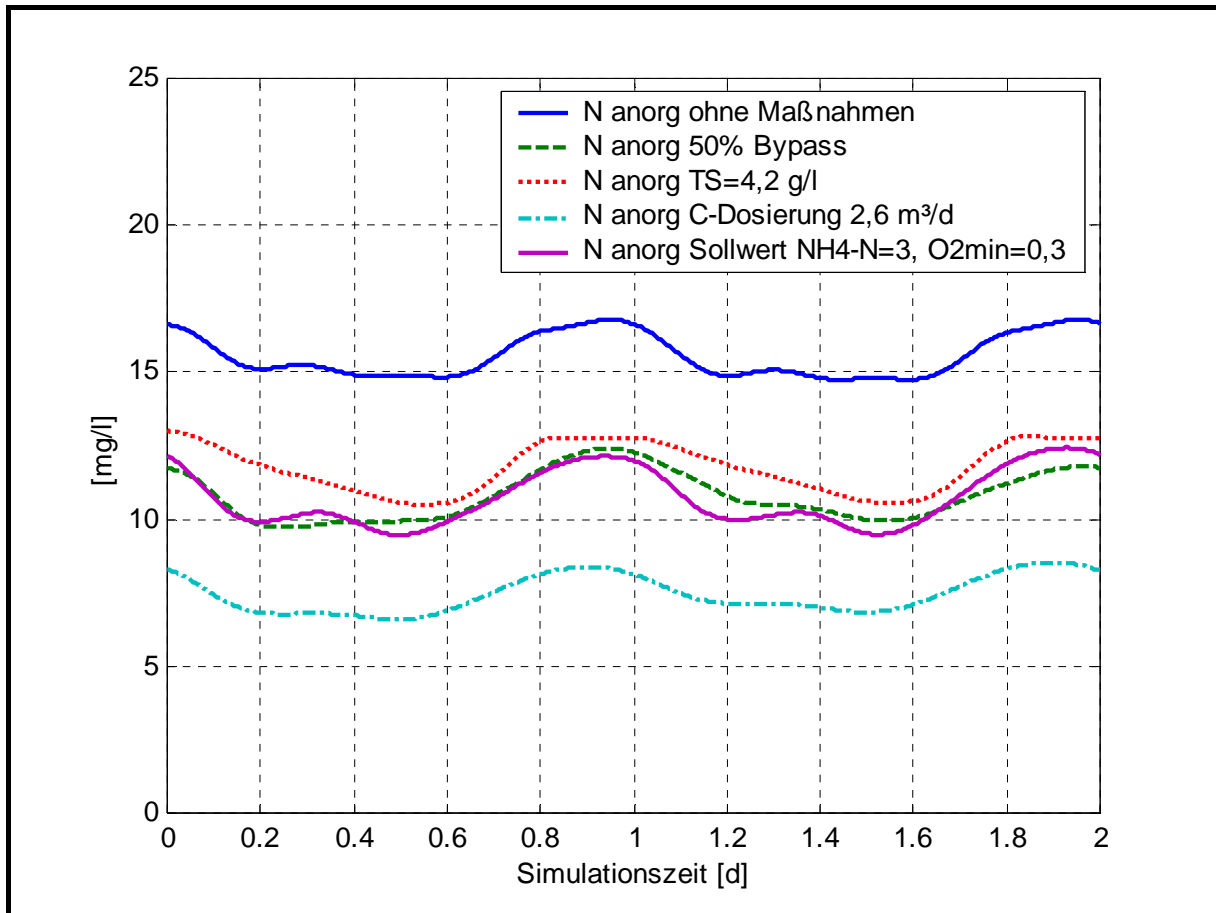


Bild 8: Gegenüberstellung der Ablaufkonzentrationen für N_{anorg} für Variante 3 bei unterschiedlichen betrieblichen Maßnahmen, Lastfall 250.000 E

Da eine Dosierung einer externen Kohlenstoffquelle mit zusätzlichen Betriebskosten verbunden ist, bietet es sich an, mehrere Maßnahmen zu kombinieren, um so die Dosierungsmenge verringern oder ganz auf eine Dosierung einer externen Kohlenstoffquelle verzichten zu können. Die Ergebnisse bei einer Kombination mehrerer Maßnahmen sind in Bild 9 dargestellt. Hier zeigte sich, dass auch ohne eine C-Quellen-Dosierung der Überwachungswert für N_{anorg} sicher eingehalten werden kann. Die geringsten Ablaufkonzentrationen ergaben bei einer Kombination von einer Bypassführung um die A-Stufe von 50 %, einer Anhebung des TS-Gehaltes auf 4,2 g/l und Veränderung der Sollwerte für $\text{NH}_4\text{-N}$ von 2 auf 3 mg/l und Sauerstoff von 1 auf 0,3 mg/l.

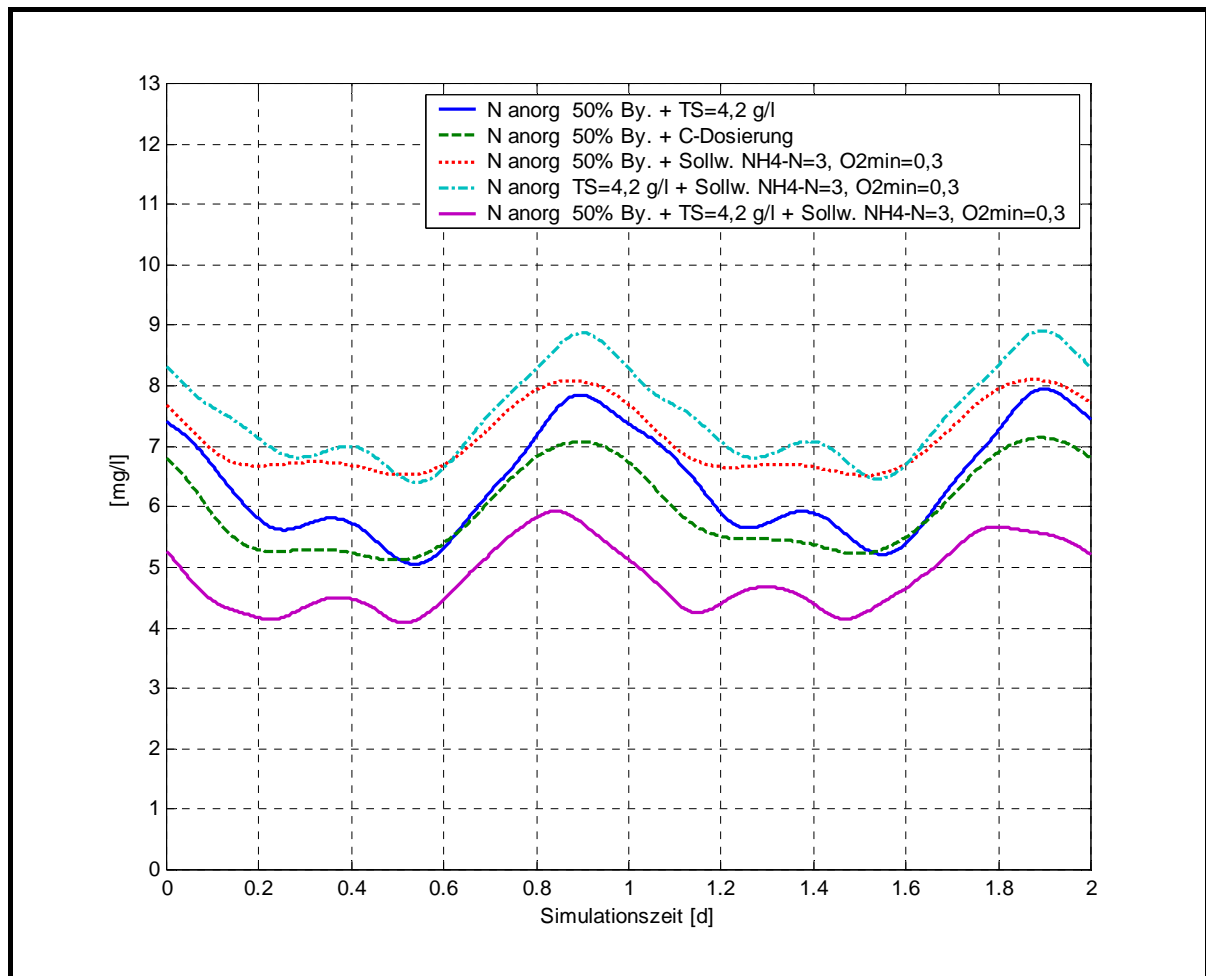


Bild 9: Gegenüberstellung der Ablaufkonzentrationen für N_{anorg} für Variante 3 bei einer Kombination mehrerer betrieblichen Maßnahmen, Lastfall 250.000 E

Eine Untersuchung der Ablaufkonzentrationen bei mittleren Zulaufbelastungen (bezogen auf die Jahre 2002 und 2003) hochgerechnet auf eine Anschlussgröße von 250.000 E ergab keine Überschreitung des Überwachungswertes für N_{anorg} . Allerdings war auch in diesem Fall die Berücksichtigung zusätzlicher Maßnahmen sinnvoll.

5 Zusammenfassung und Fazit

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde ein Simulationsmodell der Schwachlastbelebungsstufe und der Tropfkörper der Kläranlage Moers-Gerdt erfolgreich kalibriert. Zur Ermittlung der bestmöglichen Integration der bestehenden Tropfkörper in den Gesamtreinigungsprozess auf dieser Kläranlage wurden vier Varianten einer Einbindung dieser Tropfkörper mittels dynamischer Simulation untersucht. Die Nitrifikationsleistung der Tropfkörper differierte bei den einzelnen Varianten erheblich. Der höchste Abbau an TKN in den Tropfkörpern wurde bei einem Einsatz der Tropfkörper zur Nitrifikation der Schlammwässer erzielt.

Um eine sichere Einhaltung der geforderten Überwachungswerte auf der Kläranlage Moers-Gerdt gewährleisten zu können, wird die Anwendung der folgenden Maßnahmen empfohlen:

- Bypassführung um die A-Stufe
- Erhöhung des TS-Gehaltes in der B-Stufe
- Dosierung einer externen Kohlenstoffquelle
- Modifikation der Steuerung des Blendenregulierschiebers

Unter der Voraussetzung, dass eine externe Kohlenstoffquelle dosiert wird oder mehrere der anderen genannten Maßnahmen kombiniert werden, ist es mit der vorhandenen Bausubstanz möglich, die geforderten Überwachungswerte für $N_{\text{anorganisch}}$ auch für den Endausbauzustand einzuhalten.

Die erfolgreiche Anwendung des Biofilmmodells für Tropfkörper unterstreicht den allgemeingültigen Charakter dieses Modellansatzes für unterschiedliche Formen von Festbettreaktoren und ermöglicht somit die Erweiterung des Anwendungsgebietes der dynamischen Simulation auch auf derartige Kläranlagen.

6 Literatur

Buer, T.; Herbst, H.; Seyfried, A. (2002)

Studie zum Einfluss der Mitbehandlung des Abwassers der Firma ONKEN auf den Betrieb der Kläranlage Moers-Gerdt, Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH-Aachen, unveröffentlicht

MUNLV NRW (2003)

Entwicklung und Stand der Abwasserbeseitigung in Nordrhein-Westfalen, 10. Auflage