

Universität Stuttgart
Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft

Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft und Wasserrecycling

Prof. Dr.-Ing. H. Steinmetz

Arbeitsbereich Abwassertechnik

Dr.-Ing. J. Krampe

Bandtäle 2, D - 70569 Stuttgart

Einsatz des Tropfkörperverfahrens unter verschiedenen länderspezifischen Einflussfaktoren

Im Rahmen des BMBF-Verbundprojekts:

Exportorientierte Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Abwasserbehandlung

Schlussbericht

Auftraggeber:

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

(Vorhaben-Nr. 02WA0544)

Fabio Chui Pressinotti, M. Sc.

Dr.-Ing. Jörg Krampe

Juli 2007

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 2 | Ziele | 2 |
| 3 | Stand des Wissens über das Tropfkörperverfahren | 3 |
| 3.1 | Verfahrensprinzip | 3 |
| 3.2 | Einflussfaktoren auf die Reinigungsleistung | 5 |
| 3.2.1 | Organische Belastung | 5 |
| 3.2.2 | Betriebseinstellungen | 9 |
| 3.2.3 | Temperatur | 10 |
| 3.2.4 | Tropfzeit | 12 |
| 3.2.5 | Sauerstoffversorgung | 13 |
| 4 | Bemessungsansätze für die Auslegung von Tropfkörperanlagen | 16 |
| 4.1 | Allgemeines | 16 |
| 4.2 | ATV-DVWK-A 281 (2001) | 16 |
| 4.3 | EN 12255-7 (2002) | 18 |
| 4.4 | U.S. EPA 832-F-00-014 (2000a) und U.S. EPA 832-F-00-015 (2000b) | 19 |
| 4.5 | Sonstige amerikanische Modellansätze | 20 |
| 4.6 | Der Bemessungsansatz von Wolf | 23 |
| 5 | Versuchseinrichtungen und –durchführungen | 25 |
| 5.1 | Aufbau des halbtechnischen Tropfkörpers | 25 |
| 5.2 | Nachrechnung des halbtechnischen Tropfkörpers mit verschiedenen Bemessungsansätzen | 29 |
| 5.3 | Versuchsprogramm | 31 |
| 5.4 | Analytik und Untersuchungsmethoden | 33 |
| 5.4.1 | Analytik des Zu- und Ablaufes (Tagesmittel) | 33 |
| 5.4.2 | Analytik im vertikalen Profil des Tropfkörpers | 33 |
| 5.4.3 | Analytik im Tagesverlauf | 33 |
| 5.4.4 | Ermittlung der Tropfzeit | 34 |
| 5.4.5 | Erfassung des Abtropfgewichts | 35 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 5.4.6 | Luftströmungsmessungen | 35 |
| 5.4.7 | Olfaktometrische Messungen | 35 |
| 6 | Versuchsergebnisse mit gemäßigten Temperaturen (Referenzphase) | 37 |
| 6.1 | Betriebseinstellungen und Abwasserbeschaffenheit | 37 |
| 6.2 | Reinigungsleistung im Tagesmittel | 38 |
| 6.3 | Reinigungsleistung im vertikalen Profil des Tropfkörpers | 39 |
| 7 | Versuchsergebnisse mit hohen Temperaturen | 43 |
| 7.1 | Betriebseinstellungen und Abwasserbeschaffenheit | 43 |
| 7.2 | Reinigungsleistung im Tagesmittel | 44 |
| 7.2.1 | BSB ₅ - und CSB-Elimination | 44 |
| 7.2.2 | NH ₄ -N-Elimination | 49 |
| 7.2.3 | Vergleich der Füllmaterialien anhand der organischen Flächenbelastung | 52 |
| 7.2.4 | N _{ges} - und P _{ges} -Elimination | 53 |
| 7.2.5 | Vergleich der Leistungskurven mit Literaturdaten | 56 |
| 7.2.6 | Zusammenstellung der Daten | 61 |
| 7.3 | Reinigungsleistung im vertikalen Profil des Tropfkörpers | 63 |
| 7.4 | Reinigungsleistung im Tagesverlauf | 68 |
| 7.5 | Schlamm und Biofilm | 73 |
| 7.5.1 | Biomassenwachstum und Überschussschlammproduktion | 73 |
| 7.5.2 | Schlamm- und Biofilmeigenschaften | 76 |
| 7.6 | Tropfzeit | 81 |
| 7.7 | Belüftung | 87 |
| 7.8 | Geruchsentwicklung | 91 |
| 8 | Versuchsergebnisse mit versäuertem Abwasser | 93 |
| 9 | Zusammenfassung | 96 |
| 10 | Literaturverzeichnis | 100 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|--------------------|--|
| a | Anzahl der Drehsprengerarme |
| AB | Ablauf |
| AFS | Abfiltrierbare Stoffe |
| A _R | Spezifische Füllmaterialoberfläche |
| A _{TK} | Querschnittsoberfläche des Tropfkörpers |
| B _A | Organische Flächenbelastung |
| B _{A,O} | Organische Flächenbelastung am Drehsprenger |
| B _{d,XXX} | Tägliche organische Fracht |
| B _{R,XXX} | Organische Raumbelastung |
| BSB ₅ | Biochemischer Sauerstoffbedarf |
| c | Allgemeine Konstante |
| C | Kohlenstoff |
| CSB | Chemischer Sauerstoffbedarf |
| CSB _{hom} | Chemischer Sauerstoffbedarf in der homogenisierten Probe |
| CSB _{mf} | Chemischer Sauerstoffbedarf in der filtrierten Probe (< 0,45 µm) |
| C(t) | Antwortsignal des Dirac-Impulses |
| C _{XXX} | Konzentration in der flüssigen Phase |
| dBod | Geruchsdezibel |
| D/ul | Dispersionszahl |
| E(t) | Normierte Verteilungsfunktion |
| F | Rückführverhältnis-Faktor |
| GE _E | Europäische Geruchseinheit |
| H _{Ac,äq} | Organische Säuren als Essigsäure-Äquivalent |
| h _C | Füllmaterialhöhe für die Kohlenstoffelimination |
| h _N | Füllmaterialhöhe für die Nitrifikation |
| h _{TK} | Füllmaterialhöhe für den gesamten Tropfkörper |
| k | Empirische Konstante |
| k | Reaktionsgeschwindigkeit |
| K | Hydraulische Konstante |
| k ₂₀ | Reaktionsgeschwindigkeit bei 20 °C Abwassertemperatur |
| k _B | BSB ₅ -Abbaukonstante |
| k _T | Reaktionsgeschwindigkeit bei der Temperatur T |
| LFKW | Lehr- und Forschungskläwerk der Universität Stuttgart |
| mf | Membranfiltriert (< 0,45 µm) |
| n | Umdrehungszahl des Drehsprengers |
| n | Hydraulische Konstante |
| N | Nitrifikation |
| N | Stickstoff |
| NB | Nachklärbecken |
| N _{ges} | Gesamtstickstoff |
| NH ₄ -N | Ammonium-Stickstoff |
| NO ₂ -N | Nitrit-Stickstoff |
| NO ₃ -N | Nitrat-Stickstoff |
| N _{org} | Organischer Stickstoff |
| P _{ges} | Gesamtphosphor |
| pH | pH-Wert |
| PO ₄ -P | Phosphat-Phosphor |
| Q | Gesamtdurchfluss |
| q _A | Hydraulische Oberflächenbeschickung |
| q _{A,NB} | Hydraulische Flächenbeschickung des Nachklärbeckens |
| Q _{NB} | Gesamtdurchfluss im Zulauf des Nachklärbeckens |

| | |
|--------------|--|
| R_N | Eliminierter Ammonium-Stickstoff |
| RV | Rückführverhältnis |
| RV_t | Rückführverhältnis bei Trockenwettertagen |
| SK | Spülkraft |
| t | Zeit |
| T | Temperatur |
| TK | Tropfkörper |
| TKN | Kjeldahl-Stickstoff |
| t_{NB} | Hydraulische Verweilzeit im Nachklärbecken |
| ÜS | Überschussschlamm |
| v_{MAX} | Maximale Geschwindigkeit der Luft bei eines laminaren Profils in einem tubularen Querschnitt |
| V_N | Nitrifikationsgeschwindigkeit |
| V_{NB} | Nachklärbeckenvolumen |
| V_{TK} | Tropfkörpervolumen |
| ZU | Zulauf |
| ΔN | NH_4 -N-Frachtdifferenz (Drehsprenger – Ablauf) |
| ΔT | Temperaturdifferenz (Luft – Abwasser) |
| η_1 | Kohlenstoffelimination der ersten Tropfkörperstufe |
| η_2 | Kohlenstoffelimination der zweiten Tropfkörperstufe |
| σ^2 | Varianz der Tropfzeit |
| σ_0^2 | Normierte Varianz der Tropfzeit |
| ζ | Mittlere Tropfzeit |
| Θ | Temperaturkoeffizient |

1 Einleitung

Für das Tropfkörperverfahren liegen in Deutschland und in anderen Ländern mit gemäßigten Klimaten langjährige Erfahrungen vor, auf denen die bisherigen Bemessungsansätze (z.B. ATV-DVWK, 2001; EN 12255-7, 2002; U.S. EPA 832-F-00-014; 2000a und U.S. EPA 832-F-00-015 2000b) basieren. Damit ist bei Auslegung einer Tropfkörperanlage auf der Basis dieser Bemessungsvorgaben eine adäquate Reinigungsleistung bei im Regelfall sicherem Betrieb der Anlagen gewährleistet. Da biologische Vorgänge jedoch stark temperaturabhängig sind, liegt die Vermutung nahe, dass die oben genannte für gemäßigte Klimate ermittelten Bemessungsansätze bei hohen Temperaturen nur bedingt geeignet sind, was ggf. zu einer Überdimensionierung von Anlagen in heißen Klimaten führen kann.

Andererseits ist ein Einfluss der Temperatur nicht nur auf die Abbauraten, sondern auch auf zahlreiche andere Prozesse wie z.B. Diffusionsvorgänge in den Biofilm, Sauerstofflöslichkeit, Belüftung, Geruchsbelästigung und Biofilmdicke zu erwarten. Die Dicke des Biofilms spielt eine wichtige Rolle bei der hydraulischen Verweilzeit, welche die Kontaktzeit zwischen Nährstoff und Mikroorganismen bestimmt. Untersuchungen von Gebert (2001) zeigten, dass die Biofilmdicke durch Erwärmungs- und Abkühlungseffekte aufgrund von Temperaturdifferenzen zwischen Luft und Wasser geregelt wird. Zudem können theoretisch hohe Abwassertemperaturen in Kombination mit langen Fließstrecken die Versäuerung des Abwassers im Kanalnetz verursachen, was sich auch auf die Reinigungsleistung auswirken kann. Dies sind Gründe dafür, dass die Quantifizierung des Einflusses der Temperatur auf die Kohlenstoff- bzw. $\text{NH}_4\text{-N}$ -Elimination ein widersprüchliches Thema in der wissenschaftlichen Literatur (Pöninger, 1965; Honda und Matsumoto, 1981; Wolf, 1984; Parker, 1999; Gebert 2001) ist.

Um die oben genannte Faktoren und Einflüsse der Temperatur auf das Tropfkörperverfahren zu untersuchen, wurde ein halbtechnischer Tropfkörper in der Versuchshalle der Universität Stuttgart installiert und in einer Klimakammer eingehaust. In der Klimakammer konnte die Temperatur der Luft mit Hilfe einer speziellen Klimatechnik und die des Abwassers mittels Wärmetauschern und einem Heizkörper kontrolliert werden. Um zwei Füllmaterialien zu untersuchen, wurde der Tropfkörper in der Mitte durch eine vertikale PVC-Wand geteilt. Eine Hälfte wurde mit Lavaschlacke, die andere Hälfte mit Kunststofffüllmaterial gefüllt.

Die hier vorgestellten Untersuchungen erfolgten im Rahmen des BMBF-Verbundprojekts „Exportorientierte Forschung & Entwicklung auf dem Gebiet der Wasserver- und-entsorgung Teil II – Abwasserbehandlung und Wasserwiederverwendung“. Das Ziel des Verbundprojekts ist es, die praktischen Erfahrungen auf diesen Gebieten verstärkt für die Internationale Zusammenarbeit verfügbar zu machen.

2 Ziele

Die bisherigen Bemessungsansätze für die Auslegung von Tropfkörperanlagen basieren insbesondere auf Erfahrungen in gemäßigten Klimaten. Die Übertragung dieser Bemessungsansätze auf tropische Klimate kann nicht unmittelbar erfolgen, da sich klimatische Einflussfaktoren auf die Reinigungsleistung und die Betriebsstabilität dieses Verfahrens auswirken.

Um diese Faktoren zu untersuchen, wurde ein halbtechnischer Tropfkörper in einer Klimakammer betrieben, in der Luft- und Abwassertemperaturen geregelt werden konnten. Zwei Füllmaterialien wurden separat untersucht (Lavaschlacke und Kunststofffüllmaterial).

Der Betrieb des Tropfkörpers soll Hinweise auf die folgenden Punkte geben:

- Reinigungsleistung und Betriebsstabilität des Tropfkörpers bei hohen Temperaturen;
- Leistungsvergleich zwischen Lavaschlacke und Kunststofffüllmaterial;
- Einfluss von versäuertem Abwasser auf die Reinigungsleistung des Tropfkörpers.

Zur Beurteilung der Reinigungsleistung und der Betriebsstabilität des Tropfkörpers wurden nicht nur die Analysen vom Ablauf und Zulauf berücksichtigt, sondern auch andere Einflussfaktoren wie die Tropfzeit, das Biomassewachstum und die Belüftung des Tropfkörpers. Es wurde darüber hinaus auf weitere Aspekte wie den Befall mit Fliegen und die Entwicklung von Gerüchen geachtet. Die gemeinsame Betrachtung der verschiedenen Einflussfaktoren ist unerlässlich für eine aussagekräftige Auswertung des hier behandelten Verfahrens.

Aus den gewonnenen Ergebnissen werden Empfehlungen für den Betrieb und die Bemessung von Tropfkörperanlagen in Bezug auf tropische Klimate erarbeitet.

3 Stand des Wissens über das Tropfkörperverfahren

3.1 Verfahrensprinzip

Um das Prinzip der Abwasserreinigung im Tropfkörper zu erläutern, muss auf die Biofilmtheorie zurückgegriffen werden (z.B. Rittmann und McCarty, 2001). Der Reinigungsprozess im Tropfkörper erfolgt über die Aktivitäten von Mikroorganismen, welche auf der Aufwuchsfläche des Tropfkörperfüllmaterials aufgrund des dort verfügbaren Nährstoffangebotes siedeln. Je nach Nährstoffangebot, Beschaffenheit des Abwassers, Strömungsbedingungen (Horn, 2004), Abweidung der Biomasse durch Makroorganismen und Jahreszeit (Gebert, 2001) entwickeln sich Biofilme mit verschiedenen Dicken und Dichten. Der Transport von Nährstoffen im Biofilm erfolgt hauptsächlich durch Diffusion. Je nach der Sauerstoffkonzentration können sich aerobe, anoxische und anaerobe Schichten in den verschiedenen Tiefen des Biofilms bilden (Abbildung 3.1).

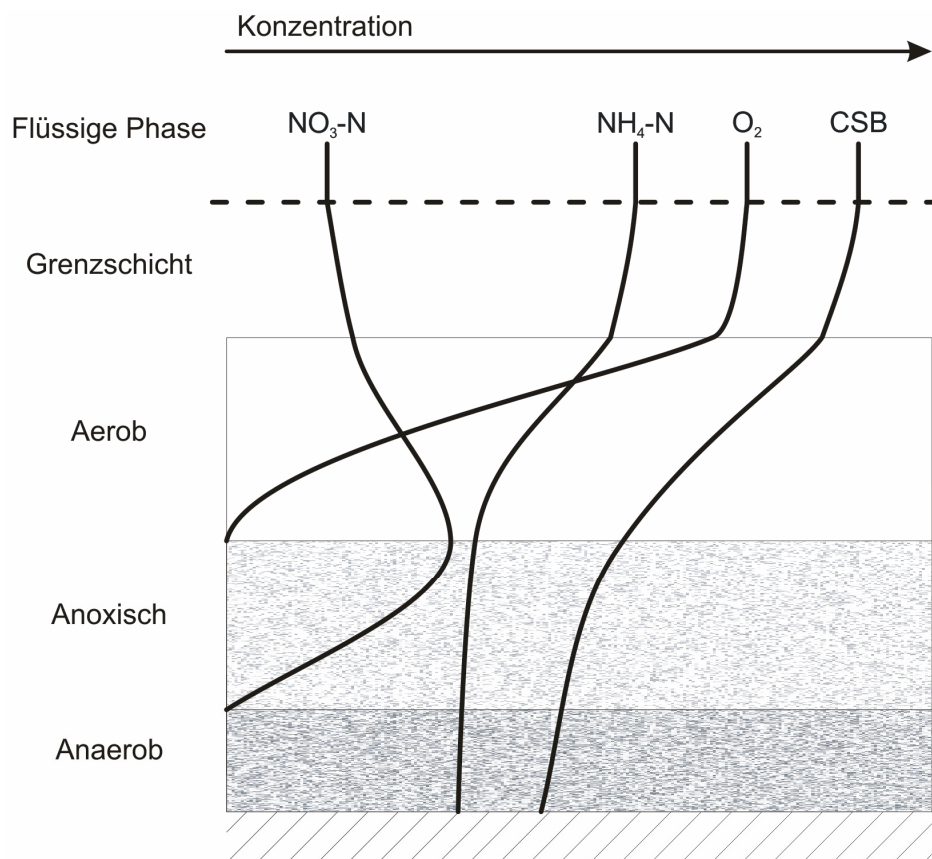


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung des Schichtenaufbaus und der Abbauvorgänge im Biofilm (nach ATV, 1997)

Die Selektion der in den verschiedenen Schichten existierenden Mikroorganismen ist selbstregulativ (Wilderer und Nahrgang, 1982). Nach einer Anpassungszeit mit

konstanten Umweltbedingungen ordnen sich die Mikroorganismen so ein, dass die verschiedenen Organismen in einer Art Gemeinschaft zusammenleben. Nur die Organismen, die daraus einen Vorteil ziehen können, werden selektiert.

Da das Abwasser im Tropfkörper von oben nach unten durchsickert, nehmen die Nährstoffkonzentrationen entlang der Fließstrecke infolge von Abbauvorgängen im Biofilm kontinuierlich ab. Aus diesem Grund ist über den Konzentrationsgradient im Querschnitt des Biofilms hinaus ein Konzentrationsgradient im vertikalen Profil des Tropfkörpers zu finden. Die daraus resultierende Vielfalt an Mikroorganismen und die synergetischen Effekte durch deren Kooperation miteinander ermöglicht theoretisch die Entwicklung von sehr spezialisierten Mikroorganismen, welche für den Abbau von sogar schwerabbaubaren Stoffen nützlich sein können (ATV, 1997).

In der oberen Tropfkörperschicht werden zunächst die schnell abbaubaren organischen Inhaltstoffe von heterotrophen Mikroorganismen abgebaut. Partikuläre Substanzen müssen zuerst enzymatisch hydrolysiert werden. Schwerabbaubare Stoffe werden erst im unteren Bereich eliminiert. Erst nach einem weitgehenden Abbau der organischen Inhaltstoffe treten Nitrifikanten auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die hohe Wachstumsrate der Heterotrophen zur Verdrängung der Nitrifikanten in die untere Tropfkörperschicht führt.

Die Abbaugeschwindigkeiten sind in erster Linie vom Nährstoffangebot abhängig, d.h. von der Substratkonzentration und der Wassermenge (Mudrack und Kunst, 1994). Da die Substratkonzentrationen im oberen Bereich des Tropfkörpers besonders hoch sind, ist die Schlammproduktion in diesem Bereich dementsprechend hoch. Der langfristige Betrieb des Tropfkörpers würde also zur allmählichen Verstopfung der Poren der Füllmaterialien führen, falls der Überschussschlamm nicht ausreichend ausgelesen wird. Für den Austrag des Schlammes sind die von den hydraulischen Bedingungen abhängigen Scherkräfte wichtig. Im Fall vom Tropfkörper wurde in diesem Sinne die so genannte Spülkraft als eine Funktion der hydraulischen Flächenbeschickungen, Drehsprenger-ausführung und Umdrehungszahl definiert. Je höher die Spülkraft, umso höher ist die Spülwirkung und so mehr Schlamm wird ausgelesen.

Wenn der Zulauf verdünnt werden kann (in der Regel durch Rückführwasser), können die Konzentrationen im Zulauf so gering gehalten werden, dass der Schlammaustrag durch die Spülkraft das Biomassenwachstum kompensiert. Im idealen Fall wird eine stabile Biofilmdicke erreicht und die Gefahr von Verstopfung ausgeschlossen, wenn die Schlammproduktion und der Schlammaustrag gleich sind.

Das Verstopfungsrisiko wird weiterhin durch das Füllmaterial (Porengröße und Struktur) beeinflusst. Des Weiteren ist das Füllmaterial zur Ansiedlung der Mikroorganismen bedeutsam, so dass es über eine hohe spezifische Oberfläche (m^2/m^3) verfügen sollte. Lavaschlacke mit einer Körnung zwischen 40 – 80 mm, einer spezifischen Oberfläche von $90 \text{ m}^2/\text{m}^3$ und ca. 50% Hohlraum erwies sich in den letzten Jahrzehnten als zuverlässig und effizient. Von diversen Firmen wurden später Kunststofffüllmaterialien entwickelt, welche über höhere spezifische Oberflächen (über $200 \text{ m}^2/\text{m}^3$) und größere Poren (bis ca. 95%) verfügen. Leistungsvergleiche in den letzten Jahren deuten darauf hin, dass

Kunststofffüllmaterialien mit „cross-flow“ Strukturen eine bessere Leistung im Vergleich zu anderen Kunststofffüllmaterialien erbringen können (Parker und Merrill, 1984; Richards und Reinhart, 1986; U.S. EPA, 2000b).

3.2 Einflussfaktoren auf die Reinigungsleistung

3.2.1 Organische Belastung

Die organische Belastung ist das wesentliche Kriterium für die Auslegung von Tropfkörperanlagen (siehe Abschnitt 4). Je nach gewünschtem Reinigungsziel (Kohlenstoffabbau, Nitrifikation oder Teilreinigung) können Tropfkörper mehr oder weniger hoch belastet werden. Tropfkörper zur Denitrifikation werden im Rahmen dieser Arbeit nicht behandelt. An dieser Stelle wird auf die Arbeiten von Rüdiger (1993) und Dorias (1996) verwiesen.

Die in diesem Abschnitt dargestellten Literaturdaten wurden aus Untersuchungen von Tropfkörperanlagen in Deutschland gewonnen und sind somit nur für die in Deutschland herrschenden Klimabedingungen gültig. Der Kenntnisstand über den Einfluss der Temperatur auf das Tropfkörperverfahren wird in Abschnitt 3.2.3 dargestellt.

Darüber hinaus beziehen sich die hier präsentierten Werte nur auf brockengefüllte Tropfkörper. Solche Tropfkörper wurden in den letzten Jahrzehnten zu einem Standard in Deutschland und es liegen daher viele Erfahrungen mit dieser Art Füllmaterial vor. Die Leistungsfähigkeit von Kunststofffüllmaterialien hängt sehr vom Hersteller bzw. von der Füllmaterialart (z.B. spezifische Oberfläche, Struktur und Hohlraumanteil) ab. Die Berücksichtigung der verschiedenen Arten von Kunststofffüllmaterialien ist daher nur schwer oder bedingt möglich, so dass darauf in dieser Arbeit verzichtet wird.

Rincke (1967) und danach Imhoff (1979) untersuchten diverse brockengefüllte Tropfkörperanlagen des Ruhrverbandes, um den Einfluss der Raumbelastung auf die Reinigungsleistung insbesondere in Bezug auf die Kohlenstoffelimination von Tropfkörper zu ermitteln. Trotz der Weiterentwicklung der Tropfkörpertechnologie in den letzten Jahren spiegeln die von Ihnen gewonnenen Leistungskurven bis heute die Leistungsfähigkeiten von Tropfkörpern in Deutschland wieder.

In Hinblick auf die BSB_5 -Elimination bekamen Rincke und Imhoff ähnliche Ergebnisse (Abbildung 3.2). Abbildung 3.3 zeigt den von Imhoff gewonnenen Vertrauensbereich bezüglich der CSB -Elimination.

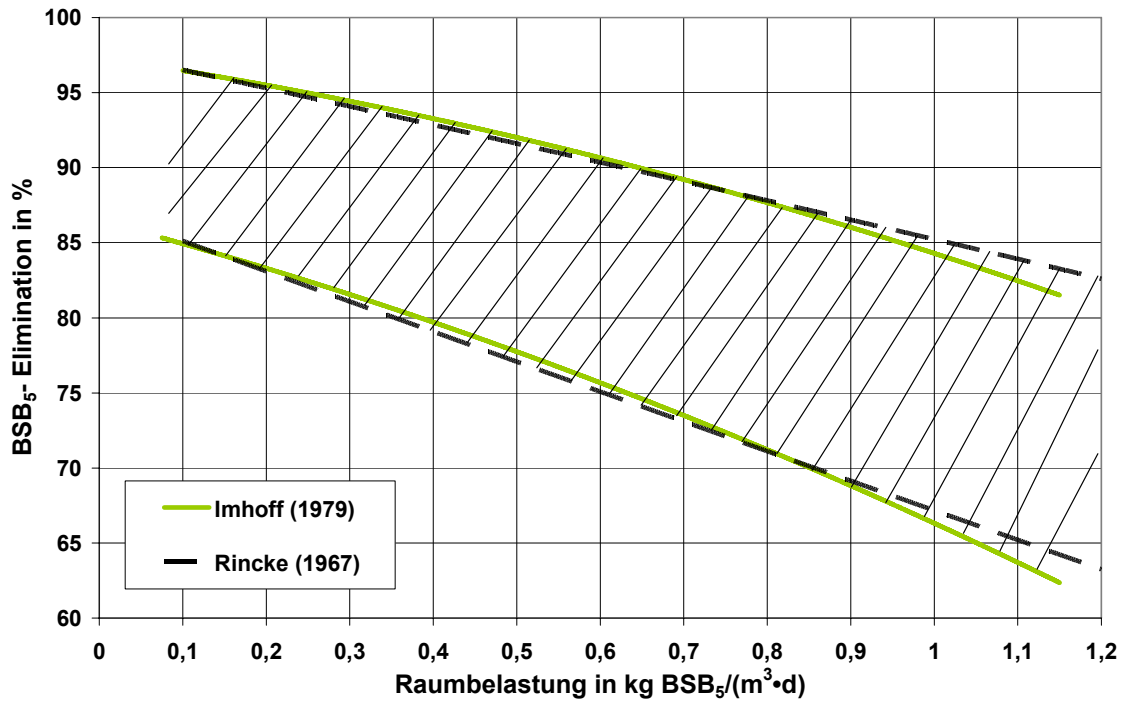


Abbildung 3.2: BSB₅-Elimination in Abhängigkeit von der BSB₅-Raumbelastung für brockengefüllte Tropfkörper des Ruhrverbandes (Rincke, 1967 und Imhoff, 1979)

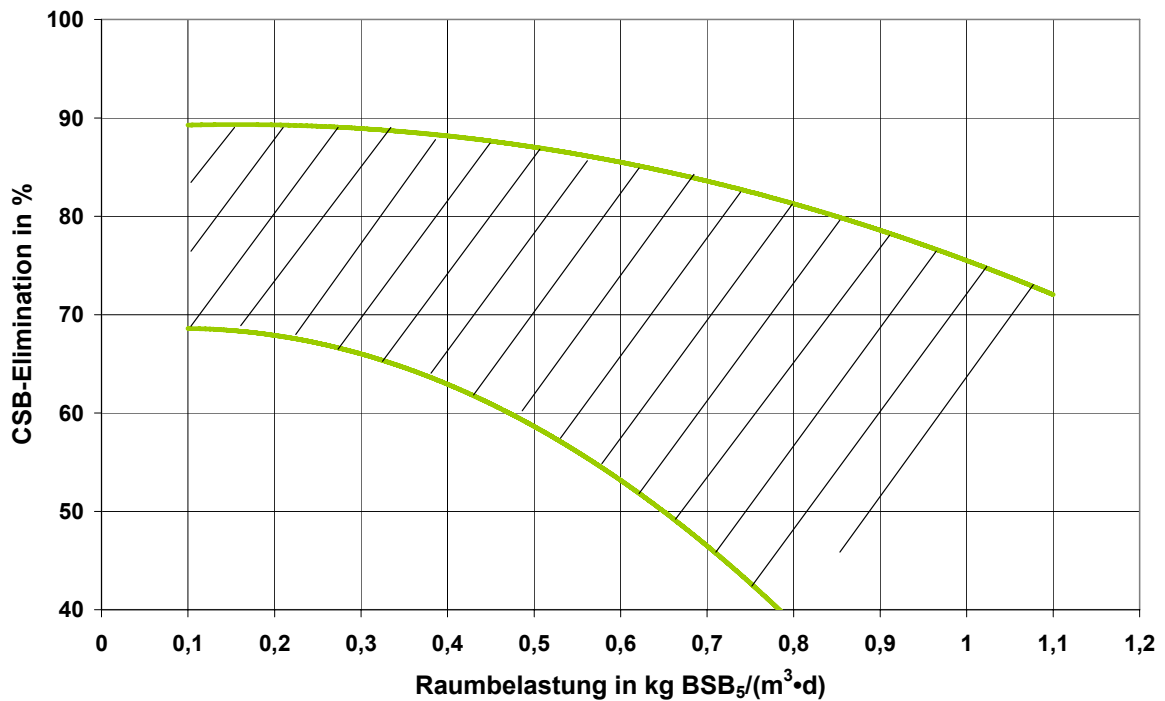


Abbildung 3.3: CSB-Elimination in Abhängigkeit von der BSB₅-Raumbelastung für brockengefüllte Tropfkörper des Ruhrverbandes (Imhoff, 1979)

Nach Imhoff gelten die Abbildung 3.2 und Abbildung 3.3 für verschiedene Abwasserkonzentrationen im Zulauf des Tropfkörpers. Werden die unteren Linien beider Abbildungen zugrunde gelegt, ist für eine Raumbelastung von $0,4 \text{ kg BSB}_5/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ (maximale zulässige Raumbelastung gemäß dem deutschen Bemessungsansatz (ATV-DVWK, 2001)) mindestens von einer BSB_5 -Elimination von ca. 80 % bzw. CSB-Elimination von ca. 63 % auszugehen.

Wolf (1984) wertete Betriebsergebnisse verschiedener Tropfkörperanlagen aus und evaluierte die Nitrifikationsleistung in Abhängigkeit von der BSB_5 -Raumbelastung anhand des Nitratanteils im Ablauf ($\text{NO}_3\text{-N} / (\text{NO}_3\text{-N} + \text{NH}_4\text{-N})$) (Abbildung 3.4). Die von Wolf erhobenen Werte stammen von Anlagen mit Abwassertemperaturen von mindestens $10 \text{ }^\circ\text{C}$.

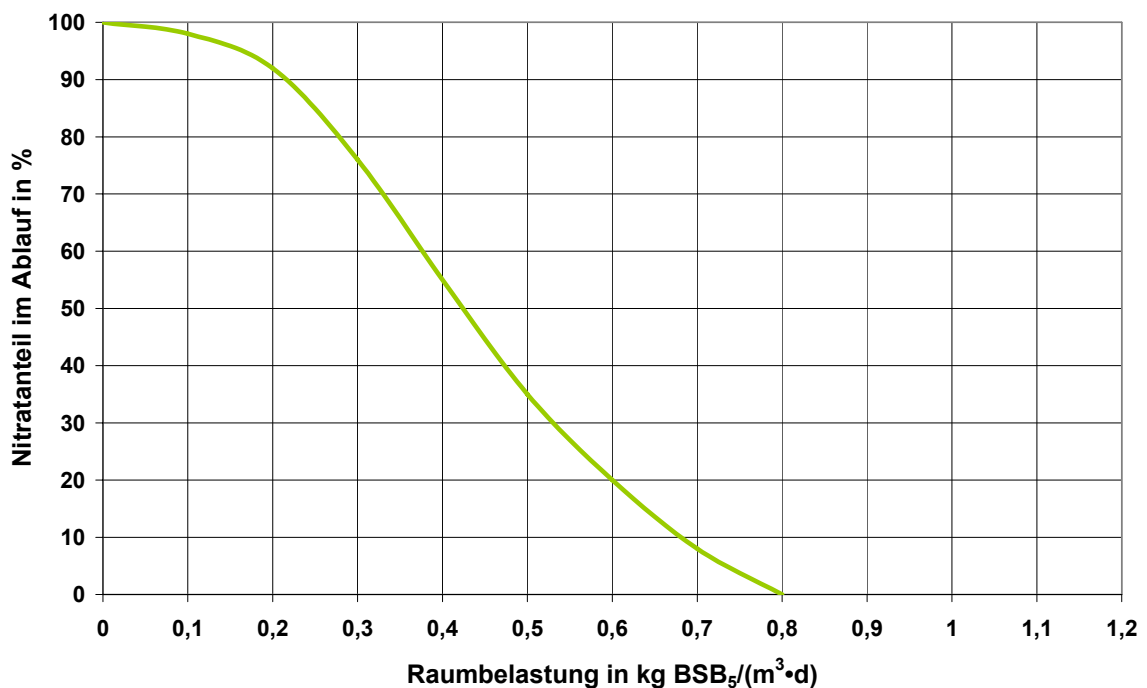


Abbildung 3.4: Nitratanteil im Ablauf ($\text{NO}_3\text{-N} / (\text{NO}_3\text{-N} + \text{NH}_4\text{-N})$) in Abhängigkeit von der BSB_5 -Raumbelastung für brockengefüllte Tropfkörper mit Abwassertemperaturen von mindestens $10 \text{ }^\circ\text{C}$ (Wolf, 1984)

Nach der obigen Abbildung wird eine Stickstoffoxidation von über 90 % in Bezug auf dem Nitratanteil im Ablauf nur bei Raumbelastungen kleiner als $0,2 \text{ kg BSB}_5/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ erreicht. Für Raumbelastungen bis $0,4 \text{ kg BSB}_5/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ist nach Wolf von einer konstanten Nitrifikationsrate von ca. $0,05 \text{ kg NH}_4\text{-N}_{\text{elim}}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ auszugehen. Zwischen $0,4$ und $0,8 \text{ kg BSB}_5/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ tritt eine Hemmung der Nitrifikation ein. Ab $0,8 \text{ kg BSB}_5/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ kann keine Nitrifikation mehr erwartet werden.

Um einen Überblick über die gesamte Stickstoffelimination in brockengefüllten Tropfkörpern zu gewinnen, kann auf die Arbeit von Rincke (1967) zurückgegriffen werden (Abbildung 3.5).

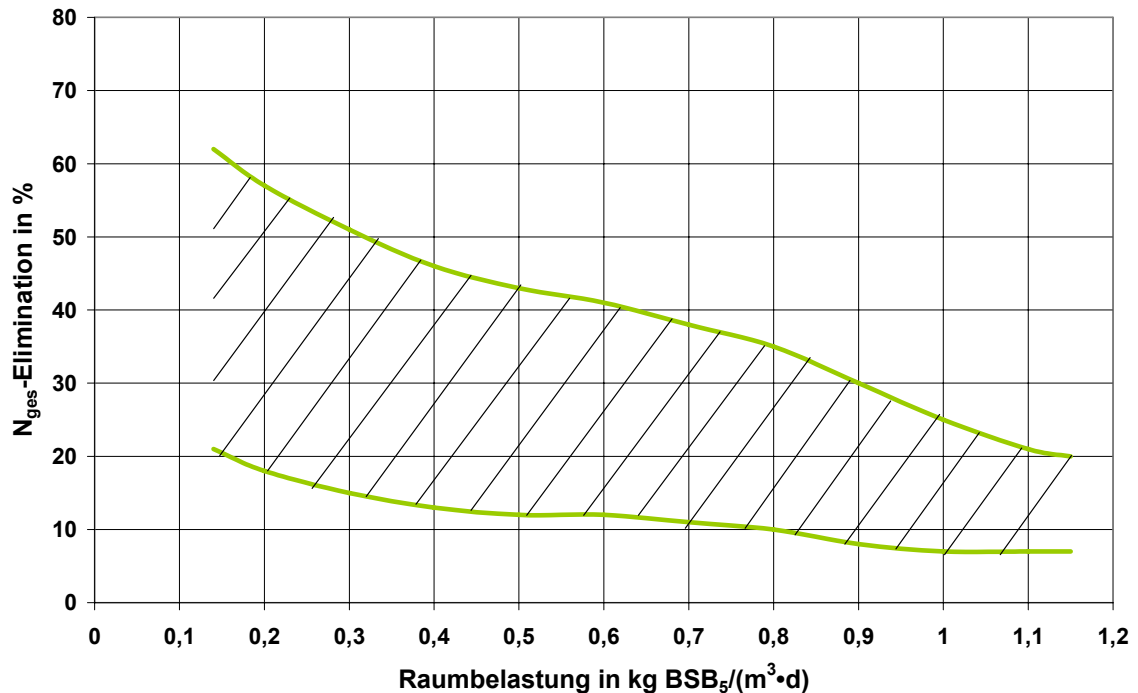


Abbildung 3.5: N_{ges} -Elimination in Abhängigkeit von der BSB_5 -Raumbelastung für brockengefüllte Tropfkörper (Rincke, 1967)

Für Raumbelastungen zwischen 0,35 und 0,75 kg $BSB_5/(m^3 \cdot d)$ ist bei brockengefüllten Tropfkörpern nur eine geringe Veränderung der N_{ges} -Elimination zu beobachten. Mit abnehmender Raumbelastung steigt kontinuierlich die gesamte Menge an eliminiertem Stickstoff an. Die Stickstoffelimination erfolgt insbesondere im kleinen Raumbelastungsbereich nicht nur über den Stickstoffeinbau in die Biomasse, sondern auch über Denitrifikationsvorgänge. Angesichts des zurückgeführten Nitrats- bzw. Nitrits wird Stickstoff durch Denitrifikation in der oberen Tropfkörperschicht freigesetzt (Rincke, 1967).

Im Vergleich zu brockengefüllten Füllmaterialien können kunststoffgefüllte Tropfkörper eine höhere Leistungsfähigkeit erreichen (Wolf, 1984, Richards und Reinhart, 1986; Harrison und Daigger, 1987).

Die Abbauvorgänge im vertikalen Profil von schwach belasteten brocken- und kunststoffgefüllten Tropfkörpern sind jedoch im Wesentlichen sehr ähnlich (Wilderer und Nahrgang, 1982; Wolf, 1987 und Gebert, 2001). In der oberen Schicht des Tropfkörpers erfolgt der Abbau von organischen Inhaltstoffen. Eine signifikante Nitrifikation tritt erst nach einem fortgeschrittenen Kohlenstoffabbau auf und erfolgt mit einer annähernden konstanten Geschwindigkeit bis zum Tropfkörperablauf.

Solche Profilmessungen wiesen zudem darauf hin, dass die Denitrifikationsvorgänge in der oberen Schicht von kunststoffgefüllten Tropfkörpern im Gegensatz zu brockengefüllten Tropfkörpern erst bei höheren Belastungen (Wolf, 1984) bzw. bei dickem Biofilm im Winter (Gebert, 2001, siehe Abschnitt 3.2.3) auftreten. Bei brockengefüllten

Tropfkörpern erfolgt die simultane Denitrifikation das ganze Jahr über (Maisch und Schwentner, 1994).

3.2.2 Betriebseinstellungen

Die Betriebseinstellungen einer Tropfkörperanlage können wesentliche Reinigungsleistungsunterschiede bewirken und dürfen daher der Einstellung der organischen Raumbelastung nicht untergeordnet werden.

Flächenbeschickung

Eine minimale Flächenbeschickung ist zur vollständigen Benetzung bzw. Ausnutzung der Aufwuchsfläche und Vermeidung von Trockenstellen wichtig. Nur so kann die maximale Leistung eines Tropfkörpers erreicht werden. In Deutschland haben sich Flächenbeschickungen zwischen 0,4 und 0,8 m/h bewährt, wobei bei Kunststofffüllmaterialien der letztere Wert einzuhalten ist (ATV-DVWK, 2001). Richtwerte von verschiedenen Bemessungsansätzen sind in Abschnitt 4 zusammen gestellt. Obwohl höhere Flächenbeschickungen zur Verkürzung der Tropfzeit und Erhöhung der Dispersion des Wassers im Tropfkörper führen (siehe Abschnitt 3.2.4) werden die Reinigungsleistungen mit zunehmenden Flächenbeschickungen infolge der Verbesserung der Abwasserverteilung in der Regel besser. Zu hohe Flächenbeschickungen sollen allerdings vermieden werden.

Die Erhöhung der Flächenbeschickung hat zudem die Verminderung von Tropfkörperfliegen zur Folge. Die Anwesenheit von Tropfkörperfliegen kann vorteilhaft sein, indem sie das Wachstum eines zu dicken Biofilms in der oberen Schicht vermeiden. Sie kann aber auch nachteilig sein, wenn ein starker Befall eintritt. Im diesen Fall kann die Reinigungsleistung des Tropfkörpers beeinträchtigt werden (Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, 1999).

Rückführverhältnis

Die Rezirkulation des Tropfkörperablaufes dient zur Einhaltung der minimalen Flächenbeschickung und zur Verdünnung des Zulaufs. Mit abnehmendem Nährstoffangebot nehmen die Wachstumsraten der Mikroorganismen ab und Verstopfungen können leichter vermieden werden. Wolf (1984) empfiehlt BSB₅-Werte am Drehsprenger zwischen 100 und 150 mg/l je nach angestrebter Ablaufkonzentration. Nach dem Arbeitsblatt A 281 (ATV-DVWK, 2001) sind 150 mg/l nicht zu überschreiten.

Spülkraft

In Deutschland haben sich Spülkräfte zwischen 4 und 8 mm (ATV-DVWK, 2001) bewährt, wobei die letztere bei Kunststofffüllmaterialien einzuhalten ist. Die World Environment Federation (WEF) empfiehlt die in Tabelle 3.1 dargestellten Spülkräfte in Abhängigkeit von der Raumbelastung (Metcalf und Eddy, 2003).

Tabelle 3.1: Empfohlene Spülkräfte in Abhängigkeit von der BSB₅-Raumbelastung nach WEF (Metcalf und Eddy, 2003)

| BSB ₅ -Raumbelastung in kg/(m ³ ·d) | Spülkraft (Betriebsmodus) in mm | Spülkraft (Spülmodus) in mm |
|---|---------------------------------|-----------------------------|
| 0,25 | 10 – 30 | ≥ 200 |
| 0,50 | 15 – 45 | ≥ 200 |
| 1,00 | 30 – 90 | ≥ 300 |
| 2,00 | 40 – 120 | ≥ 400 |
| 3,00 | 60 – 180 | ≥ 600 |
| 4,00 | 80 – 240 | ≥ 800 |

Die Abhängigkeit der Spülkraft von der BSB₅-Raumbelastung ist sinnvoll, da mit zunehmender Raumbelastung die Menge an eliminierten BSB₅ bzw. CSB und demnach die Schlammproduktion steigt.

Wasserverteilung

Durch die Anpassung der Abwasserverteilung entlang der Drehsprengerachse konnte Gebert (2001) die NH₄-N-Ablaufwerte von großtechnischen kunststoffgefüllten Tropfkörperanlagen wesentlich verbessern. Der Einsatz von fein verarbeiteten Drehsprengern (z.B. mit Prallblechen) scheint insbesondere für das Kunststofffüllmaterial wichtig zu sein.

3.2.3 Temperatur

In Bezug auf die Kohlenstoffelimination wurde in vielen Arbeiten (z.B. Velz, 1948; Gromiec et al., 1972; Quirk, 1972; Solbé et al., 1974; Särner, 1980; Parker und Terril, 1984; Richards und Reinhart, 1986; Logan et al., 1987a; Harrison und Daigger, 1987) der Einfluss der Temperatur nach der folgenden Gleichung berücksichtigt:

$$k_T = k_{20} \cdot \theta^{T-20}$$

Der Koeffizient k ist die Reaktionsgeschwindigkeit und wird anhand vom Temperaturkoeffizient θ und k_{20} (= k bei 20 °C Abwassertemperatur) korrigiert. θ wird in der Regel als 1,035 angenommen, obwohl kleinere und größere Werte in der Literatur zu finden sind (z.B. Velz, 1948 und Solbé et al., 1974). Särner (1980) wies auf die Möglichkeit hin, dass θ von der organischen Belastung abhängig sein könnte.

Wolf (1984) wertete die BSB₅-Werte im Ablauf von verschiedenen Tropfkörpern unter verschiedenen Raumbelastungen und bei unterschiedlichen Temperaturen aus und folgerte daraus, dass im Bereich zwischen 5 und 40 mg/l je Grad Temperaturerniedrigung eine Zunahme des BSB₅ von etwa 2 – 3 mg/l zu erwarten ist. Diese Feststellung wird von der obigen Formel nur bedingt gedeckt.

Honda und Matsumoto (1981) untersuchten eine Tropfkörperversuchsanlage zwischen 5 und 30 °C. Dabei nahmen mit zunehmender Temperatur der Schlammaustrag und die Autolyse zu. Bei abnehmender Temperatur wurde festgestellt, dass die Biofilmdicke zunahm. Aufgrund der beiden vorgenannten Effekte und des Temperatureffektes (höhere biologische Aktivität bei höheren Temperaturen) konnte bei 15 °C eine maximale BSB₅-Elimination festgestellt werden.

Die Effekte der Temperatur auf die Nitrifikation sind ebenfalls nicht abschließend geklärt. Parker (1999) beobachtete bei Untersuchungen mit nachgeschalteten Tropfkörpern für die Nitrifikation eine Abnahme der NH₄-N-Elimination von 24 % für einen Abfall der Abwassertemperatur von 20,2 auf 13,8 °C. Betriebswerte einer Tropfkörperanlage in Ohio (U.S. EPA, 2000b) zeigten eine Abhängigkeit der Nitrifikation von der Abwassertemperatur nur für Temperaturen unter 15 °C an. Betriebsdaten der Kläranlage Karlsruhe (Maurer, 2006) deuteten auf keine Korrelation zwischen den NH₄-N-Werten im Ablauf und der Temperatur hin. Gebert (2001) fand einen geringfügigen Einfluss der Temperatur auf die NH₄-N-Eliminationen nur bei sehr dünnen Biofilmen.

Die Quantifizierung des Einflusses der Temperatur sowohl auf die Kohlenstoffelimination als auch die Nitrifikation ist demnach in der Literatur nicht eindeutig. Abgesehen vom Temperatureinfluss auf die Aktivität der Mikroorganismen werden auch andere Vorgänge im Tropfkörper von der Temperatur beeinflusst, die sich zum Teil gegenläufig auswirken können. Hierzu gehören:

- *Diffusionskoeffizient*: Die Diffusion von Sauerstoff und anderen Nährstoffen in den Biofilm ist unter anderem temperaturabhängig. Bei höheren Wassertemperaturen werden höhere Diffusionskoeffizienten erreicht (Onuma et al., 1985; Logan et al., 1987a), was sich positiv auf den Stoffumsatz auswirkt;
- *Sauerstofflöslichkeit*: Die Sauerstofflöslichkeit ist von der Wassertemperatur abhängig. Mit zunehmender Temperatur nimmt die Sauerstofflöslichkeit im Wasser ab, was sich negativ auf die aeroben Prozesse auswirkt;
- *Abkühlung durch den Wind*: Im Winter kann die Reinigungsleistung durch kalte Winde beeinträchtigt werden. Füllmaterialien mit großen Durchgängen unterliegen einer stärkeren Abkühlung (ATV, 1997);
- *Belüftung*: Wie im Abschnitt 3.2.5 beschrieben, bestimmt die Temperaturdifferenz zwischen der Außenlufttemperatur und der vom Abwasser stark beeinflussten Innenlufttemperatur die Luftströmung im Tropfkörper; die Luftströmung spielt eine wichtige Rolle bei der Sauerstoffversorgung;
- *Biofilmdicke*: Es ist aus der allgemeinen Betriebserfahrung bekannt, dass die Biofilmdicke nicht über das ganze Jahr konstant ist (Pönninger, 1965; Mudrak und Kunst, 1994; Gebert, 2001). Mit Eintritt des Winters akkumuliert sich der Schlamm im Tropfkörper bis zum Frühjahr, wo der höchste Wert erreicht wird. Kurz vor dem Sommer kommt es zu einem großen Schlammabstoß. Gebert (2001) wies darauf hin, dass es nach einem starken Schlammaustrag zu einer Verschlechterung der Nitrifikation kommen kann. Es wird hier jedoch nicht von einem Zusammenbruch

der Nitrifikation gesprochen. Der Biofilm bleibt dünn in den warmen Monaten und wird erst im Herbst wieder dicker. In der Übergangszeit mit dünnen Biofilmen und abnehmenden Temperaturen kann auch eine Verschlechterung der Reinigungsleistung beobachtet werden. Im Winter können die Reinigungsleistungen in machen Fällen sogar besser als im Sommer sein, da die Erhöhung der Biomassemenge in dieser Jahreszeit (welche im Vergleich zum Sommer mehrfach größer sein kann) die langsameren Umsatzraten der Mikroorganismen kompensieren kann (Gebert, 2001).

Die Gründe der Ablösung des Biofilms im Frühjahr und sein Anwachsen im Herbst wurden von einigen Wissenschaftlern (Pönninger, 1965; Mudrack und Kunst, 1994) auf die Fresstätigkeit von Makroorganismen zurückgeführt. Gebert (2001) kam allerdings nach der Untersuchung von Versuchs- und großtechnischen Tropfkörpern zu dem Schluss, dass es sich um einen komplexeren Prozess handelt. Die Makroorganismen können nach Gebert nicht allein die Verantwortung für die Biofilmablösung tragen. Die Ablösung bzw. das Anwachsen des Biofilms scheinen auf die Umstellung des Abwasser- und Lufttemperaturverhältnisses angewiesen zu sein. Der Anfang der Biofilmablösung tritt erst ein, nachdem die Lufttemperaturen höher als die Abwassertemperaturen sind, so dass der Biofilm vor der Ablösung erwärmt. Analog dazu tritt das Anwachsen des Biofilms erst ein, nachdem die Lufttemperaturen niedriger als die Abwassertemperaturen sind, so dass der Biofilm vor dem Anwachsen abkühlt.

3.2.4 Tropfzeit

Die Tropfzeit bestimmt in erster Linie die Kontaktzeit zwischen Substraten und Mikroorganismen. Je länger die Kontaktzeit, desto besser sollte die Reinigungsleistung sein. Im idealen Fall haben alle Fluidteilchen im Tropfkörper dieselbe Verweilzeit, so dass die einzelnen Teilchen ohne axiale Vermischung absickern. In diesem Fall spricht man von einem Pfropfenströmungsreaktor („plug-flow“ Reaktor). In der Realität vermischt sich das Wasser teilweise aufgrund von hydraulischen Kurzschlüssen (Kanalbildungen), Retentionen, Wasserverteilung und Bewuchs auf dem Füllmaterial (Rüdiger, 1993 und Gebert, 2001).

Die axiale Vermischung der Fluidteilchen ist durch die Dispersionszahl charakterisiert. Je höher die Dispersionszahl ist, desto größer ist die axiale Vermischung. Rüdiger (1993) und Gebert (2003) stellten fest, dass auch der Bewuchs auf dem Füllmaterial einen Einfluss auf die Vermischung ausübt. Rüdiger untersuchte Tropfkörper zur Denitrifikation mit hohen Belastungen und zeigte, dass höhere Biomassemengen das Wasser länger im Biofilm halten können, was zum Anstieg der Durchmischung des Abwassers im Reaktor führt. Gebert (2003) untersuchte die Dispersion in verschiedenen Tropfkörperhöhen von schwach belasteten Anlagen und konnte die Feststellung von Rüdiger nur in der oberen Tropfkörperschicht im Winter bei dickem Biofilm bestätigen.

Die Struktur des Füllmaterials ist sehr wichtig für die Tropfzeit und Dispersion des Wassers. Bruns und Krauth (1999) zeigten, dass die Tropfzeiten bei

Kunststofffüllmaterialien nicht unbedingt kleiner als bei Brockenfüllungen sind. Müller und Sekoulov (1985) sowie Rüdiger (1993) beobachten, dass kunststoffgefüllte Tropfkörper tendenziell höhere axiale Vermischungen im Vergleich zu Lavaschlacke-Tropfkörpern aufweisen können.

Der Zusammenhang zwischen der Tropfzeit und der Flächenbeschickung wird im Allgemeinen durch die folgende Formel beschrieben (z.B. Eckenfelder und Barnhart, 1963; Rincke, 1967; Särner, 1980; Parker und Merrill, 1984; Richards und Reinhart, 1986; Rüdiger (1993) und Gebert (2001)):

$$\zeta = \frac{K \cdot h_{TK}}{q_A^n}$$

Mit: K, n = empirische Koeffizienten je nach Füllmaterial und Betriebseinstellungen
 h_{TK} = Tropfkörperhöhe

Die Erhöhung der Flächenbeschickung hat demnach die Verminderung der Tropfzeit zur Folge. Bei kontinuierlicher Beschickung variierte n in der Literatur je nach Füllmaterial zwischen 0,34 und 0,70 (Richards und Reinhart, 1986; Harrison und Daigger, 1987).

Der Einfluss der Flächenbeschickung auf die Dispersionszahlen wurde von Gebert (2001) untersucht. Festgestellt wurde eine annähernde lineare Zunahme der Dispersionszahlen mit zunehmender Flächenbeschickung.

Die Erhöhung der Flächenbeschickung wirkt sich daher rein theoretisch negativ auf die Reinigungsleistung des Tropfkörpers aus. Jedoch kann bei machen Fällen durch die Verbesserung des Ausnutzungsgrads der Aufwuchsfläche und die Benetzung des Füllmaterials sogar ein Anstieg der Reinigungsleistung mit zunehmender Flächenbeschickung beobachtet werden. Gebert (2001) stellte z.B. bei einem kunststoffgefüllten Versuchstropfkörper fest, dass bei hoher Rückführung ($q_A > 0,8$ m/h) eine deutliche verbesserte Nitrifikation eintritt.

Der Einfluss der Tropfzeit auf die Reinigungsleistung von Tropfkörpern ist in einigen mathematischen Modellansätzen, insbesondere bei den verschiedenen Adaptationen der Velz-Gleichung (siehe Abschnitt 4.5), enthalten.

3.2.5 Sauerstoffversorgung

Die Sauerstoffversorgung beim Tropfkörperverfahren wurde bislang wenig erforscht. Ein wichtiger Mechanismus zur Sauerstoffversorgung ist die durch die Temperaturdifferenz der Innen- und Außenluft Luftdurchströmung im Tropfkörper. Diese Temperaturdifferenz erzeugt durch Konvektionsprozesse eine natürliche Luftbewegung innerhalb des Tropfkörpers (Kamineffekt).

Da die Innenlufttemperatur stark von der Wassertemperatur abhängt, fanden Halvorson et al. (1936) eine Korrelation zwischen der Temperaturdifferenz (Außenluft – Wasser) und dem Volumenstrom bei einem brockengefüllten Tropfkörper (Körnungen mit ca. 40 – 50

mm) (Abbildung 3.6). Wenn die Lufttemperatur höher als die Wassertemperatur ist (typisch in den Sommermonaten von Ländern im gemäßigten Klimabereich), ergibt sich eine absteigende Luftbewegung im Tropfkörper. Wenn die Lufttemperatur niedriger als die Wassertemperatur ist (häufig in den Wintermonaten von Ländern im gemäßigten Klimabereich), ergibt sich andersrum eine aufsteigende Luftbewegung im Tropfkörper. Wenn es keine Temperaturdifferenz gibt, ist die Luftbewegung sehr langsam. Nach Halvorson et al. ist in diesem Fall die Luftfeuchtigkeitddifferenz außen und innen der Leitparameter für die Bestimmung der Strömung.

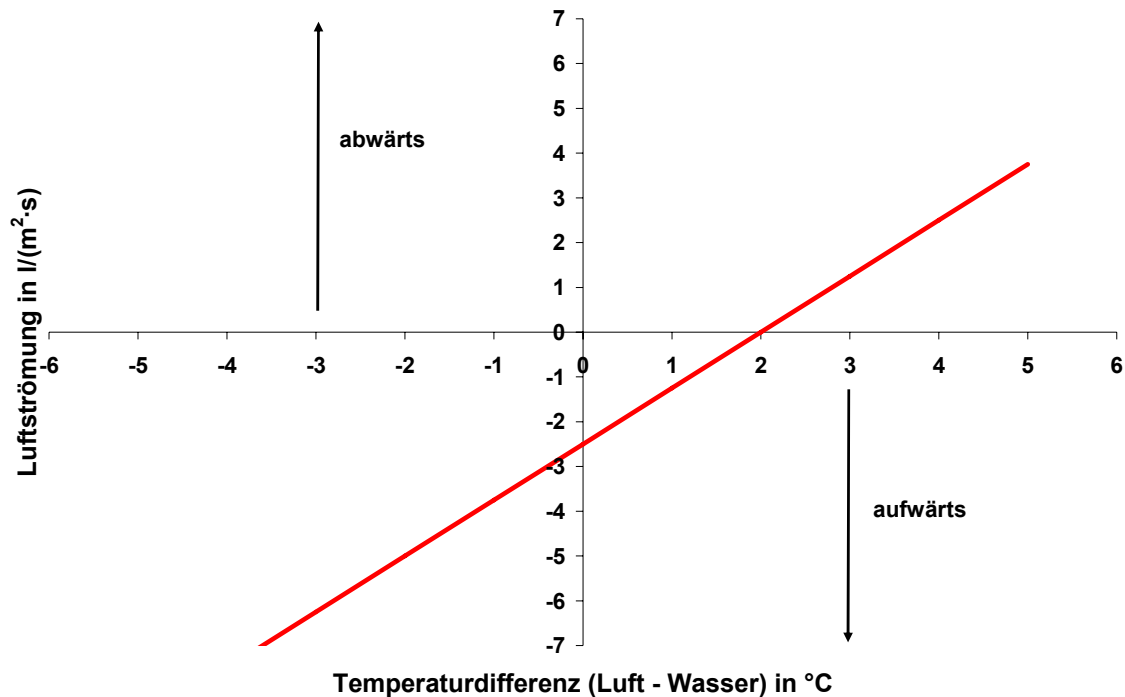


Abbildung 3.6: Luftströmung in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zwischen Luft und Wasser für einen halbertechnischen brockengefüllten Tropfkörper (Halvorson et al., 1936)

Die obige Korrelation kann nach Halvorson et al. (1936) nur gefunden werden, wenn bei konstanter Flächenbeschickung ein stabiler Betriebszustand erreicht wird.

Dorias (1996) versuchte bei Untersuchungen mit Tropfkörpern zur Denitrifikation, unter anderem den Sauerstoffeintrag durch den Einstau der Luft- und Ablauföffnungen des Tropfkörpers zu unterbinden. Als Leitparameter für den Sauerstoffeintrag wurde der gelöste Sauerstoff im Tropfkörperablauf herangezogen. Selbst ohne Belüftung wurden immer noch im Mittel 4,1 mg/l gelöster Sauerstoff im Ablauf des Tropfkörpers gemessen, was folgern lässt, dass auch andere Mechanismen zum Sauerstoffeintrag beitragen. Aus der praktischen Betriebserfahrung mit schwach belasteten Tropfkörpern wird davon ausgegangen, dass solange der gelöste Sauerstoff im Ablauf eine Konzentration über 3 mg/l (ATV, 1997) aufweist, der Tropfkörper mit ausreichendem Sauerstoff versorgt wird. Geringere Werte weisen auf örtliche anaerobe Verhältnisse und Verstopfungen hin.

Es ist bekannt, dass der gelöste Sauerstoff im Rückführwasser auch zur Sauerstoffversorgung beiträgt. Die Abläufe der Nachklärungen in Deutschland können mehr als 50% Sauerstoffsättigung aufgrund der Bauweise der Nachklärbecken aufweisen (ATV, 1997). Inwieweit die Rezirkulation zur Sauerstoffanreicherung in Wirklichkeit beiträgt, ist unbekannt. Genauso wenig untersucht ist der Beitrag zum Sauerstoffeintrag beim Kontakt des Wassers mit der Luft bei der Verteilung mit dem Drehsprenger.

Die exakte Ermittlung des Sauerstoffeintrags ist in der Praxis nicht realisierbar. Aus der Betriebserfahrung scheint die Sauerstoffversorgung nur ein Problem bei hoch belasteten Anlagen bzw. Anlagen mit einem kleinen Hohlraumvolumen oder kleinen Flächenbeschickungen zu sein (Wolf, 1987). Meist ist der Einfluss der Sauerstoffkonzentration im Wasser auf die Reinigungsleistung von stabilen, schwach belasteten Anlagen nicht limitierend.

4 Bemessungsansätze für die Auslegung von Tropfkörperanlagen

4.1 Allgemeines

In den nächsten Abschnitten werden die in der Literatur am häufigsten verwendeten Bemessungsansätze für die Auslegung von Tropfkörpern mit und ohne Nitrifikation präsentiert. Diese basieren entweder auf Erfahrungswerten oder auf empirischen mathematischen Gleichungen, die aus der Beobachtung von Leistungskurven bzw. Abbauvorgängen im Tropfkörper gewonnen wurden.

Mathematische Modelle für Nitrifikation in nachgeschalteten Tropfkörpern werden in dieser Arbeit nicht behandelt. Hierzu wird auf das Modell von Boller und Gujer (1986a) verwiesen. Ebenfalls nicht behandelt werden mathematische Biofilm-Modelle. Hierzu siehe Rittmann und McCarty (2001) sowie Eberl et al. (2006).

4.2 ATV-DVWK-A 281 (2001)

Das deutsche Arbeitsblatt 281 (ATV-DVWK, 2001) wurde 2001 für die Auslegung von Tropfkörper- und Rotationstauchkörperanlagen in Deutschland veröffentlicht. Im Gegensatz zu seinem Vorgänger (ATV, 1989) ist es für beliebige Anschlussgrößen gültig.

Je nach angestrebtem Reinigungsziel (Abwasserreinigung ohne oder mit Nitrifikation) und Füllmaterial werden zulässige Raumbelastungsbereiche vorgegeben, mit denen das erforderliche Tropfkörpervolumen errechnet werden kann (Tabelle 4.1). Das Arbeitsblatt enthält auch Vorgaben zur Dimensionierung von Tropfkörpern zur Denitrifikation. Diese sind jedoch nicht Bestandteil dieser Arbeit und werden daher hier nicht aufgegriffen.

Tabelle 4.1: Maximale zulässige Raumbelastungen nach ATV-DVWK (2001) für die Auslegung von einstufigen Tropfkörpern mit und ohne Nitrifikation

| Parameter | TK mit Nitrifikation | | TK ohne Nitrifikation | |
|--------------------|--|---|--|---|
| | Lavaschlacke und Kunststoff bis 100 m ² /m ³ | Kunststoff bis 150 m ² /m ³ | Lavaschlacke und Kunststoff bis 100 m ² /m ³ | Kunststoff bis 150 m ² /m ³ |
| B _{R,BSB} | 0,40 | 0,60 | 0,40 | 0,60* |
| B _{R,TKN} | 0,10 | 0,15 | – | – |

* Bei Nachweis durch Versuche oder Referenzen

Zusätzlich wird darauf hingewiesen, dass für nachgeschaltete Nitrifikationsstufen nach einem weitgehendem Kohlenstoffabbau in einer ersten Stufe mit Zwischenklärung TKN-Raumbelastungen bis zu 0,1 kg/(m³·d) für brockengefüllte Tropfkörper bzw. 0,2 kg/(m³·d) für kunststoffgefüllte Tropfkörper eingesetzt werden können. In diesem Fall können Kunststofffüllmaterialien mit einer spezifischen Oberfläche bis zu 200 m²/m³ verwendet werden.

Die Volumina für den Kohlenstoffabbau und die Nitrifikation werden unabhängig voneinander berechnet, so dass das gesamte Tropfkörpervolumen aus der Summe der einzelnen Volumina besteht:

$$V_{TK} = V_{TK,C} + V_{TK,N} = \frac{B_{d,BSB}}{B_{R,BSB}} + \frac{B_{d,TKN}}{B_{R,TKN}} \quad [m^3]$$

Für die Festlegung der Höhe wird darauf hingewiesen, dass sich 4 m für brockengefüllte Tropfkörper bewährt haben. Für kunststoffgefüllte Tropfkörper mit einer hohen vertikalen Durchgängigkeit werden größere Höhen empfohlen.

Für die Einstellung des Rückführverhältnisses müssen zwei Faktoren beachtet werden. Zum einen muss die Rezirkulation so eingestellt werden, dass der mittlere BSB₅ am Drehsprenger durch Verdünnung kleiner als 150 mg/l ist. Zum anderen muss eine Mindestflächenbeschickung für die Gewährleistung einer gleichmäßigen und flächenproportionalen Abwasserverteilung eingestellt werden. Im Bezug auf das erste Kriterium kann das Rückführverhältnis mit der nachfolgenden Formel berechnet werden:

$$RV_t = \left(\frac{C_{BSB}}{150 \text{ mg/l}} \right) - 1 \quad [-]$$

Es muss anschließend geprüft werden, ob die Oberflächenbeschickung bei maximalem Zufluss bei Trockenwetter einschließlich Rückführung mindestens 0,4 bis 0,8 m/h erreicht. Für Kunststofffüllmaterialien sollte der letztere Wert angestrebt werden. Werden die minimalen Werte nicht eingehalten, kann die Höhe bzw. das Rückführverhältnis verändert werden.

Die Umdrehungszahl des Drehsprengers ist nach der Anzahl der Drehsprengerarme und der Spülkraft zu bestimmen:

$$S_k = \frac{q_A \cdot 1000}{a \cdot (n \cdot 60)} \quad [\text{mm} / (\text{Drehsprengerarm} \cdot \text{Umdrehung})] \text{ bzw. } [\text{mm}]$$

Mit: a = Anzahl der Drehsprengerarme
 n = Umdrehungen in upm

Spülkräfte zwischen 4 und 8 mm werden empfohlen. Mit zunehmenden Höhen bzw. spezifischen Füllmaterialoberflächen sind höhere Spülkräfte einzusetzen.

Die Bemessung der Nachklärung basiert auf hydraulischen Aspekten. Anhand der Flächenbeschickung bei maximalem Zufluss unter Berücksichtigung des Regenwetters und des Rückführverhältnisses können die erforderliche Oberfläche und das erforderliche Volumen errechnet werden:

$$\text{erf. } A_{NB} = \frac{Q_{NB}}{\text{zul. } q_{A,NB}} \quad [m^2]$$

$$\text{erf. } V_{NB} = t_{NB} \cdot Q_{NB} \quad [m^3]$$

Für Feststoffmengen im Ablauf kleiner als 20 mg/l darf die Oberflächenbeschickung der Nachklärung 0,8 m/h nicht überschreiten. Die Durchflusszeit sollte nicht weniger als 2,5 h betragen. Die Tiefe sollte für Rundbecken bei 2/3 Radius nicht weniger als 2 m sein. Für Hinweise zur Beckenform und -gestaltung sowie für detaillierte Informationen zur Bemessung des Tropfkörpers im Allgemeinen wird auf das Arbeitsblatt 281 verwiesen.

4.3 EN 12255-7 (2002)

Der Europäische Standard EN 12255-7 (2002) wurde für die Auslegung von Biofilmreaktoren ab 50 EW vom Europäischen Komitee für Normung (CEN) erarbeitet. Es handelt sich hierbei um allgemeine Regeln für die biologischen Verfahren von kommunalen Abwässern.

Im Gegensatz zu dem deutschen Arbeitsblatt 281 (ATV-DVWK, 2001) werden hierin verschiedenen Füllmaterialhöhen je nach Reinigungsziel vorgeschlagen:

- Für Tropfkörper mit Nitrifikation und Hochlasttropfkörper zur Teilreinigung werden Höhen zwischen 4 und 7 m empfohlen;
- Für nachgeschaltete Tropfkörper zur Vollreinigung werden Höhen zwischen 1,8 und 7 m empfohlen;
- Für vorgefertigte Tropfkörperanlagen für Anschlussgrößen zwischen 51 und 100 EW wird eine Mindesthöhe von 0,6 m empfohlen.

Zudem wird ein maximaler Durchmesser von 50 m angesichts von Grenzen bei der Auslegung von Drehsprengern empfohlen. Falls keine Feinsiebung vorhanden ist, müssen die Drehsprengerdüsen einen Mindestdurchmesser von 20 mm haben. Bei intermittierenden Beschickungen muss das Füllmaterial mindestens 1 mal alle 30 min beschickt werden, um Austrocknungen zu vermeiden.

In der britischen Version (BS EN, 2002) ist im Anhang (National Annex NA) eine Tabelle (Tabelle 4.2) mit typischen Belastungen je nach Reinigungsziel für brockengefüllte Tropfkörper zu finden. Dieser Anhang ist ein nationaler Anhang von Großbritannien und ist nicht in der deutschen Version beigefügt.

Tabelle 4.2: Typische Belastungswerte für die Auslegung von brockengefüllten Tropfkörpern in Abhängigkeit vom Reinigungsziel („National Annex NA“ im BS EN, 2002)

| Reinigungsziel | Art der Belastung | Füllmaterialoberfläche in m^2/m^3 | Raumbelastung | | Flächenbeschickung in m/h |
|----------------------------------|-------------------|---|---|---|---|
| | | | $\text{kg BSB}_5/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ | $\text{Kg NH}_4\text{-N}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ | |
| Teilreinigung | Hoch | 40 bis 100 | 0,5 – 5 | - | 0,2 – 2 |
| C-Elimination bzw. Nitrifikation | Schwach | 80 – 200 | 0,05 – 5 | 0,01 – 0,05 | 0,03 – 0,1 |
| Nachgeschaltete Nitrifikation | Schwach | 150 – 200 | < 40 $\text{mg}/\text{l BSB}_5$ | 0,04 – 0,2 | 0,2 – 1 |

* Konzentration im Zulauf

Die oben dargestellten Belastungen wurden anhand von Erfahrungswerten für Abwassertemperaturen zwischen 6 und 18 °C erstellt. Auffallend dabei sind die geringe Flächenbeschickungen für Tropfkörper mit Nitrifikation im Vergleich zu den üblichen Werten in Deutschland (mindestens 0,4 m/h für die Lavaschlacke bzw. mindestens 0,8 m/h für das Kunststofffüllmaterial). Außerdem ist es wichtig hervorzuheben, dass die Raumbelastung für die Nitrifikation auf $\text{NH}_4\text{-N}$ bezogen ist, statt auf TKN wie beim Arbeitsblatt 281 (ATV-DVWK, 2001). Der Unterschied zwischen $\text{NH}_4\text{-N}$ und TKN ist vom Ammonifikationsgrad abhängig und kann je nach der Länge der Kanalisation und Abwasserzusammensetzung variieren.

Nach dem National Annex NA soll die Flächenbeschickung der Nachklärbecken 1 – 1,5 m/h nicht überschreiten. Die maximale Verweilzeit beim Spitzenfluss sollte nicht größer als 2 h sein. Für Nachklärbecken mit Räumern variieren die Bodenreibungen zwischen 14 und 6 °.

4.4 U.S. EPA 832-F-00-014 (2000a) und U.S. EPA 832-F-00-015 (2000b)

Die U.S. Environmental Protection Agency (EPA) publizierte zwei „fact sheets“ hintereinander (U.S. EPA 832-F-00-014, 2000a bzw. U.S. EPA 832-F-00-015, 2000b) mit Empfehlungen für die Auslegung von Tropfkörpern für den Kohlenstoffabbau ohne Nitrifikation bzw. mit Nitrifikation basierend auf in den Vereinigten Staaten durchgeführten Fallstudien und Forschungsergebnissen.

Aus Tabelle 4.3 können die empfohlenen Raumbelastungen je nach der gewünschten BSB_5 -Eliminationen nach U.S. EPA (2000a) für brockengefüllte Tropfkörper entnommen werden.

Tabelle 4.3: Typische Raumbelastungen von brockengefüllten Tropfkörpern ohne Nitrifikation (U.S. EPA, 2000a)

| Art der Belastung | BSB ₅ -Elimination in % | Raumbelastung in kg BSB ₅ /(m ³ ·d) |
|---------------------------|------------------------------------|---|
| Schwach | 80 – 90 | < 0,40 |
| Normal | 50 – 70 | 0,40 – 0,64 |
| Hoch | 65 – 85 | 0,64 – 1,60 |
| Sehr hoch (Teilreinigung) | 40 – 65 | 1,60 – 4,80 |

Für schwach belastete Tropfkörper wird des Weiteren darauf hingewiesen, dass für brockengefüllte Tropfkörper die Flächenbeschickung zwischen 0,04 bis zu 0,14 m/h variiert. Für kunststoffgefüllte Tropfkörper ist eine Flächenbeschickung von mindestens 1,44 m/h einzuhalten. Für brockengefüllte Tropfkörper liegen die Höhen zwischen 0,9 bis 2,4 m und Durchmesser bei bis zu 61 m. Kunststoffgefüllte Tropfkörper sind deutlich höher (6 bis 12 m) mit Durchmessern zwischen 4,3 und 12,2 m. Kleine Durchmesser und große Höhen sind typische Eigenschaften von Turmtropfkörpern.

Typische Werte von einstufigen Nitrifikationsanlagen nach U.S. EPA (2000b) sind in Tabelle 4.4 zu finden.

Tabelle 4.4: Typische Raumbelastungen von Tropfkörpern mit Nitrifikation (U.S. EPA, 2000b)

| Art des Tropfkörpers | NH ₄ -N-Elimination in % | Raumbelastung in kg BSB ₅ /(m ³ ·d) |
|------------------------|-------------------------------------|---|
| Brockenfüllung | 75 – 85 | 0,16 – 0,10 |
| | 85 – 95 | 0,10 – 0,05 |
| Kunststofffüllmaterial | 75 – 85 | 0,29 – 0,19 |
| Turmtropfkörper | 85 – 95 | 0,19 – 0,10 |

Da Kunststofffüllmaterialien über mehr Fläche verfügen, können sie höhere Raumbelastungen aufnehmen. Da höheren Flächenbeschickungen für die Nitrifikation besonders wichtig sind, werden Werte zwischen 1 bis zu 3 m/h je nach Füllmaterial empfohlen. Füllmaterialien, die sich dafür als geeignet erwiesen, sind Brocken mit Körnungen zwischen 25 bis zu 100 mm und „cross-flow“ Kunststofffüllmaterialien.

4.5 Sonstige amerikanische Modellansätze

Alternativ zu den von der U.S. EPA (2000a, 2000b) empfohlenen Bemessungswerten stehen zusätzlich verschiedene Modellansätze für die Auslegung von Tropfkörpern zur Verfügung. Eine der ersten empirischen Gleichungen für die Auslegung von brockengefüllten Tropfkörpern zur Abwasserreinigung von kommunalen Abwässern wurde vom amerikanischen National Research Council (NRC) aus der Auswertung von 34 Tropfkörperanlagen auf amerikanischen Militärbasen mit Abwassertemperaturen von 20 °C hergeleitet. Für die Herleitung dieser Gleichung wurden Ablaufwerte von

sedimentierten Proben ausgewertet. Für einstufige Anlagen lautet die NRC-Gleichung (Metcalf und Eddy, 2003) wie folgt:

$$\eta_1 = \frac{100}{1 + 0,4432 \cdot \sqrt{\frac{B_{d,BSB}}{V_{TK} \cdot F}}} \quad [\%]$$

Wobei η_1 die BSB₅-Elimination und F der so genannte Rückführverhältnis-Faktor ist:

$$F = \frac{1 + RV}{\left(1 + \frac{RV}{10}\right)^2} \quad [-]$$

Aus den obigen Gleichungen ist eine deutliche Verbesserung der BSB₅-Elimination mit zunehmender Rezirkulation zu erkennen. Diese Verbesserung wird allerdings durch den Faktor RV/10 abgeschwächt. Typischerweise werden Rückführverhältnisse zwischen 0 und 2 eingesetzt.

Die BSB₅-Elimination der ggf. zweiten Stufe η_2 ist nachfolgend angegeben:

$$\eta_2 = \frac{100}{1 + \frac{0,4432}{1 - \eta_1} \cdot \sqrt{\frac{B_{d,BSB}}{V_{TK} \cdot F}}} \quad [\%]$$

Für die Auslegung von kunststoffgefüllten Tropfkörpern kann die so genannte Velz-Gleichung angewendet werden. In den letzten Jahrzehnten wurden viele verschiedene Adaptationen dieser Gleichung zur Bemessung von einstufigen Tropfkörpern vorgeschlagen (Särner, 1980; Richards und Reinhart, 1986; Harrison und Daigger, 1987; Logan et al., 1987a).

Hierbei wird davon ausgegangen, dass die BSB₅-Elimination nach einer differentialen Gleichung erster Ordnung erfolgt:

$$\frac{dC_{BSB}}{dt} = c \cdot t$$

Aus der Lösung der obigen Gleichung ergibt sich:

$$C_{BSB,AB} = C_{BSB,ZU} \cdot e^{-c \cdot \zeta}$$

Die Konstante ζ ist die mittlere Tropfzeit (siehe Abschnitt 3.2.4). Unter Einbeziehung der Abhängigkeit der Tropfzeit von der Flächenbeschickung ($\zeta = K \cdot h_{TK} / q_A^n$) kann die Velz-Gleichung in ihrer allgemeinen Form hergeleitet werden:

$$C_{BSB,AB} = C_{BSB,ZU} \cdot e^{-\frac{k \cdot h_{TK}}{q_A^n}}$$

Mit: $k = c \cdot K =$ empirischer Koeffizient in $(m/h)^n/m$

Der Einfluss der Temperatur ist in der Regel berücksichtigt, indem k mit der nachfolgenden Formel korrigiert wird (Abschnitt 3.2.3):

$$k_T = k_{20} \cdot (1,035)^{T-20}$$

Es wurden in der Literatur verschiedene andere Adaptationen der Velz-Gleichung zur Einbeziehung der Rezirkulation und Füllmaterialeigenschaften verwendet (z.B. Eckenfelder und Barnhart, 1963; Richards und Reinhart, 1986; Harrison und Daigger, 1987 und Logan et al., 1987a). Die am häufigsten verwendete modifizierte Velz-Gleichung (Parker und Merrill, 1984) wird wie folgt angegeben:

$$C_{\text{BSB,AB}} = \frac{C_{\text{BSB,ZU}}}{(1+RV) \cdot \exp\left\{\frac{k_{20} \cdot A_R \cdot h_{\text{TK}} \cdot 1,035^{(T-20)}}{[(Q_{\text{ZU}} / A_{\text{TK}}) \cdot (RV + 1)]^n}\right\} - RV} \quad [\text{mg/l}]$$

Parker und Merrill bestimmten k_{20} für „cross-flow“ bzw. vertikal durchströmten Kunststofffüllmaterialien und fanden Werte von 0,0019 bzw. 0,0014 $\text{l}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})^{0,5}$. Der Parameter n wurde zu 0,5 angenommen.

Für nitrifizierende Tropfkörper kann der Ansatz von Okey und Albertson (Metcalf und Eddy, 2003) verwendet werden. Okey und Albertson fanden eine Korrelation zwischen dem BSB_5/TKN -Verhältnis und der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Elimination (Abbildung 4.1).

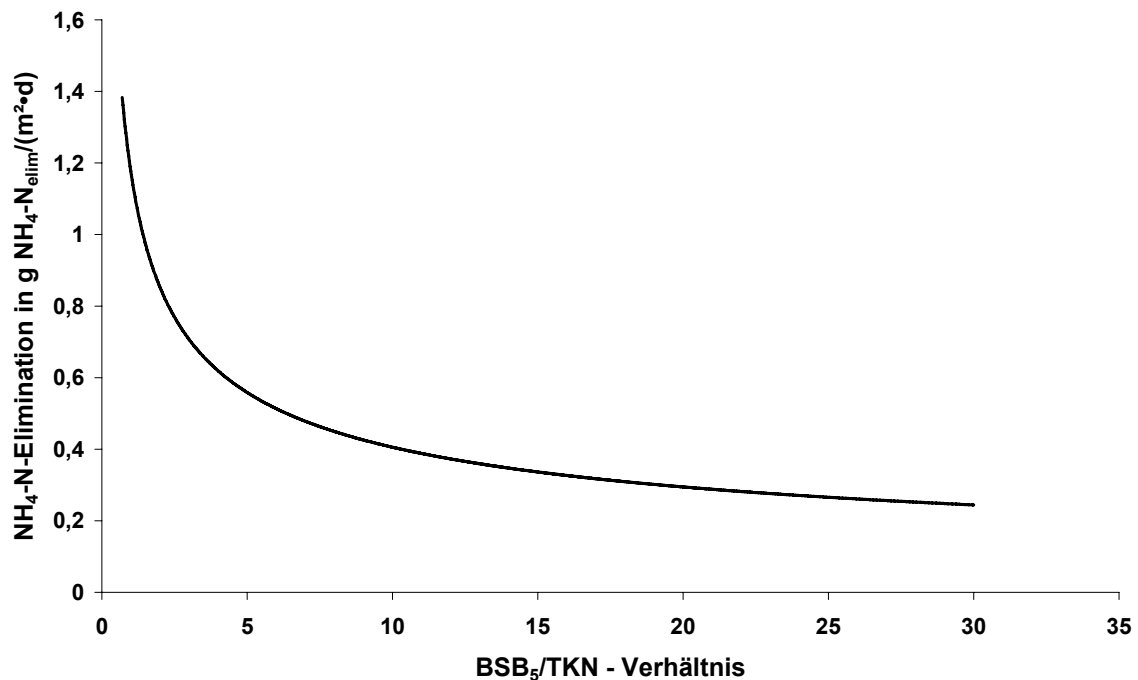


Abbildung 4.1: $\text{NH}_4\text{-N}$ -Elimination in Abhängigkeit des BSB_5/TKN -Verhältnisses (nach Okey und Albertson in Metcalf und Eddy, 2003)

Die obige Kurve wurde bei Abwassertemperaturen zwischen 9 und 20 °C ermittelt. Die folgende Formel kann zur Auslegung von nitrifizierenden Tropfkörpern verwendet werden. Sie entspricht aus Sicherheitsgründen einer Kurve 25 % unter der in Abbildung 4.1 dargestellten Kurve.

$$R_N = 0,82 \cdot \left(\frac{C_{BSB_5}}{C_{TKN}} \right)^{-0,44} \quad [\text{g NH}_4\text{-N}_{\text{elim}}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})]$$

Aus der ermittelten Rate R_N kann die erforderliche Füllmaterialoberfläche berechnet werden. Bei diesem Ansatz muss die Kohlenstoffelimination nicht berücksichtigt werden.

4.6 Der Bemessungsansatz von Wolf

Der Modellsansatz von Wolf (1987) basiert auf Flächenbelastungen und wurde für die Auslegung von Nitrifikationsanlagen konzipiert. Es wird dabei angenommen, dass die BSB_5 -Elimination im vertikalen Profil des Tropfkörpers einer exponentiellen Gleichung entspricht. Eine lineare $\text{NH}_4\text{-N}$ -Elimination beginnt erst, wenn die BSB_5 -Flächenbelastung einen bestimmten zulässigen Wert (zul. B_A) erreicht (Abbildung 4.2).

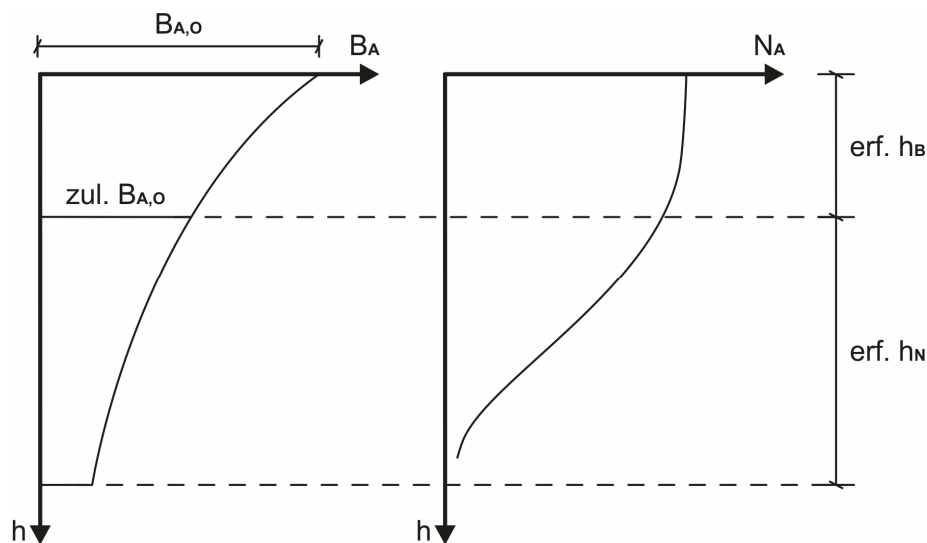


Abbildung 4.2: Schematische Darstellung der Abbauvorgänge im vertikalen Profil des Tropfkörpers gemäß dem Modelansatz von Wolf (1987)

Der BSB_5 -Abbau erfolgt nach der folgenden Gleichung:

$$B_A(h) = B_{A,O} \cdot e^{-k_B \cdot h_{TK} \cdot A_R / (q_A \cdot 24)} \quad [\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})]$$

Mit: B_A = organische BSB_5 -Flächenbelastung auf der Höhe h in $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$
 $B_{A,O}$ = BSB_5 -Flächenbelastung am Drehsprenger in $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$
 k_B = BSB_5 -Abbaukonstante in m/d
 h_{TK} = Füllmaterialhöhe in m
 A_R = spezifische Füllmaterialoberfläche in m^2/m^3
 q_A = Flächenbeschickung in m/h

Die erforderliche Höhe für die Kohlenstoffelimination kann aus der obigen Gleichung hergeleitet werden:

$$\text{erf. } h_B = \frac{(\ln B_{A,O} - \ln (\text{zul. } B_A)) \cdot 24 \cdot q_A}{k_B \cdot A_R} \quad [\text{m}]$$

Die erforderliche Höhe für die Nitrifikation kann wie folgt berechnet werden:

$$\text{erf. } h_N = \frac{\Delta N}{V_N \cdot A_R \cdot A_{TK}} \quad [\text{m}]$$

Mit: ΔN = $\text{NH}_4\text{-N}$ -Frachtdifferenz (Drehsprenger – Ablauf) in g/d
 V_N = Nitrifikationsgeschwindigkeit in $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$
 A = Querschnittsfläche des Tropfkörpers in m^2
 A_R = spezifische Füllmaterialoberfläche in m^2/m^3

Die Nitrifikationsgeschwindigkeit V_N bezieht sich auf einen Mittelwert über der gesamten Fließstrecke. Die gesamte erforderliche Tropfkörperhöhe ergibt sich daher aus:

$$\text{erf. } h_{\text{ges}} = \text{erf. } h_B + \text{erf. } h_N \quad [\text{m}]$$

Aus Tabelle 4.5 können Erfahrungswerte von Wolf (1987) für die notwendigen Parameter in Abhängigkeit von der Temperatur entnommen werden:

Tabelle 4.5: Empfohlene Werte für k_B , zul. B_A und V_N nach Wolf (1987) in Abhängigkeit von der Temperatur (V_N berechnet für 5 mg $\text{NH}_4\text{-N/l}$ im Ablauf)

| Temperatur in °C | k_B in m/d | zul. B_A in $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ | V_N in $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ |
|------------------|--------------|--|---|
| 5 | 0,1 | 2,5 – 4 | 0,3 – 0,4 |
| 10 | 0,2 | 4 – 7 | 0,4 – 0,6 |
| 15 | 0,3 | 7 – 12 | 0,6 – 1 |
| 20 | 0,4 | 10 – 16 | 1 – 1,6 |

Die obigen Werte wurden aus der Untersuchung von einstufigen brockengefüllten Tropfkörpern ermittelt. Nach Wolf können jedoch insbesondere die Werte für k_B und V_N für Anforderungen, bei welchen wenig Erfahrung vorliegt, unterschiedlich sein.

5 Versuchseinrichtungen und –durchführungen

5.1 Aufbau des halbtechnischen Tropfkörpers

Im Rahmen dieses Projekts wurde ein halbtechnischer Tropfkörper in der Versuchshalle des Lehr- und Forschungskläranwerks der Universität Stuttgart (LFKW) errichtet und in eine Klimakammer zur Kontrolle der Lufttemperatur eingehaust (Abbildung 5.1-a). Die Lufttemperatur wurde anhand einer dafür installierten Klimatechnik geregelt. Die Abwassertemperatur konnte mit Hilfe von Wärmetauschern und einem Einschraubheizkörper kontrolliert werden.

Das Tropfkörpervolumen betrug $18,4 \text{ m}^3$ mit einem Durchmesser von 2,45 m und einer Füllmaterialhöhe von 3,9 m. Um die parallele Untersuchung von zwei verschiedenen Füllmaterialien zu ermöglichen, wurde der Tropfkörper durch eine PVC-Trennwand in der Mitte geteilt und eine Seite mit Lavaschlacke, die andere Seite mit Kunststoffüllmaterial gefüllt (Abbildung 5.1-b)



a) Seitenansicht der Klimakammer



b) Draufsicht des Tropfkörpers

Abbildung 5.1: Klimakammer und halbtechnischer Tropfkörper in der Versuchshalle der Universität Stuttgart

Die Eigenschaften der eingesetzten Füllmaterialien können aus Tabelle 5.1 entnommen werden.

Tabelle 5.1: Füllmaterialeigenschaften des halbtechnischen Tropfkörpers

| Füllmaterial | Herkunft | Struktur | Spezifische Oberfläche | Hohlraumanteil |
|--------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|----------------|
| Kunststoff | 2H-Kunststoff GmbH (Typ TKP 619) | Crossflow-Material (60 °) | 152 m ² /m ³ | > 95% |
| Lavaschlacke | Kläranlage Steinbronn | Aleatorisch (siehe Abbildung 5.2) | 90 m ² /m ³ * | ca. 50% * |

* Abschätzung nach ATV-DVWK (2001)

Die Körnungen der Lavaschlacke konnten aus der Sieblinie in Abbildung 5.2 hergeleitet werden. Sie lagen zwischen 36 mm (10%-Wert) und 73 mm (90%-Wert). Der 50%-Wert betrug 52 mm.

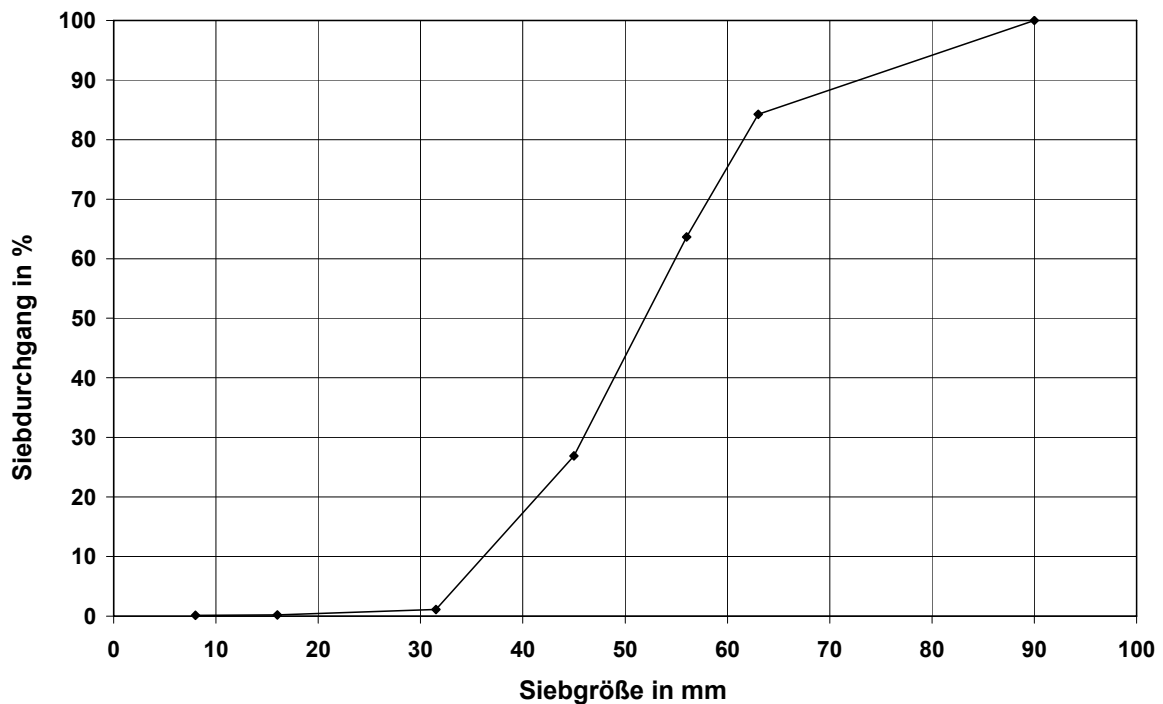


Abbildung 5.2: Sieblinie der verwendeten Lavaschlacke

In Abbildung 5.3 ist eine schematische Darstellung der Versuchsanlage dargestellt. Es wurden 20 Luftrohre zur Belüftung des Tropfkörpers im Hohlraum unter dem Gitterrost eingebaut (insgesamt 10 für jedes Füllmaterial). Der Drehsprenger bestand aus einem einzigen motorgetriebenen Arm.

Die Beschickung des Tropfkörpers erfolgte mit vorgeklärtem Abwasser des LFKW. Die Zulaufpumpe wurde analog der Ganglinie des LFKW angesteuert. Aufgrund einiger spezifischer Besonderheiten des LFKW ist der Tagesgang nicht besonders ausgeprägt.

Um eine getrennte Rezirkulation des Ablaufs beider Füllmaterialen zu ermöglichen, wurde für jedes Füllmaterial ein Nachklärbecken nachgeschaltet und eine Rezirkulationspumpe eingesetzt. Die Nachklärbecken befanden sich zusammen mit dem Tropfkörper innerhalb der Klimakammer, um temperaturbedingte Dichteströmungen in den Nachklärbecken zu vermeiden. Durch am Drehsprenger installierte Positionssensoren wurden die Rezirkulationspumpen so angesteuert, dass die Füllmaterialien nur mit den jeweiligen Rezirkulationsabläufen beschickt wurden. Beide Füllmaterialien konnten daher komplett unabhängig voneinander untersucht werden.

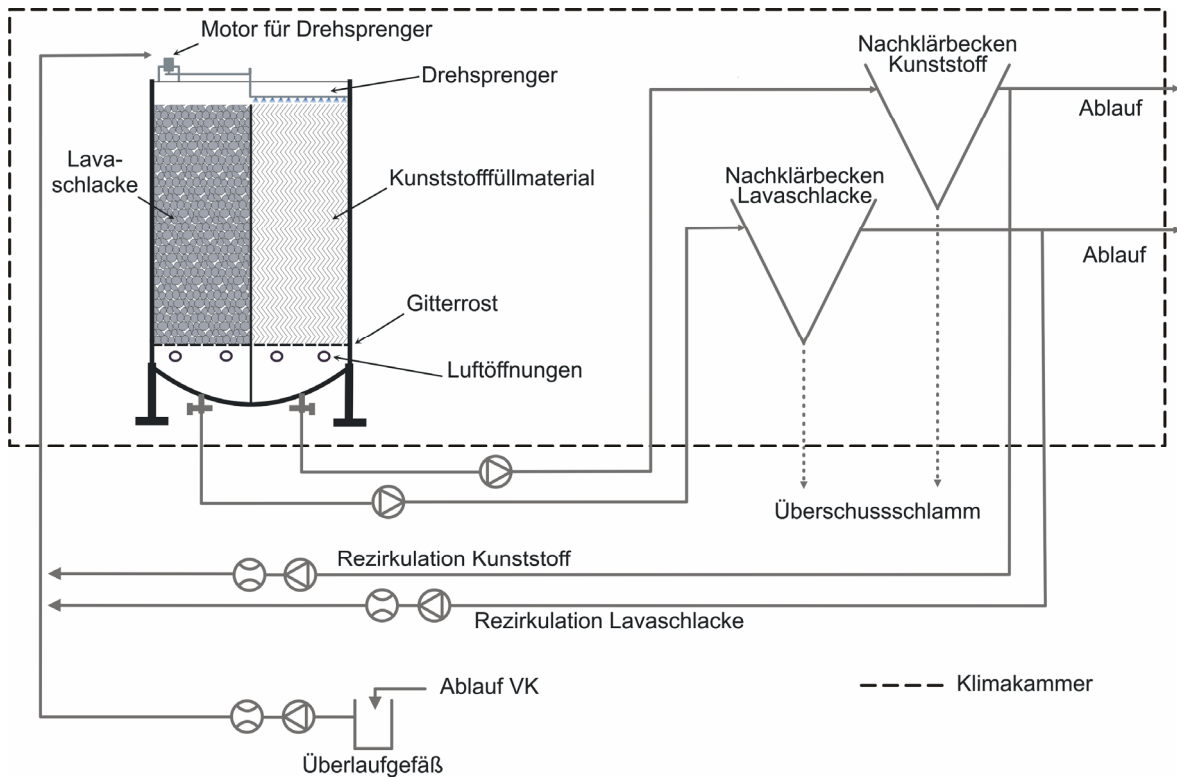
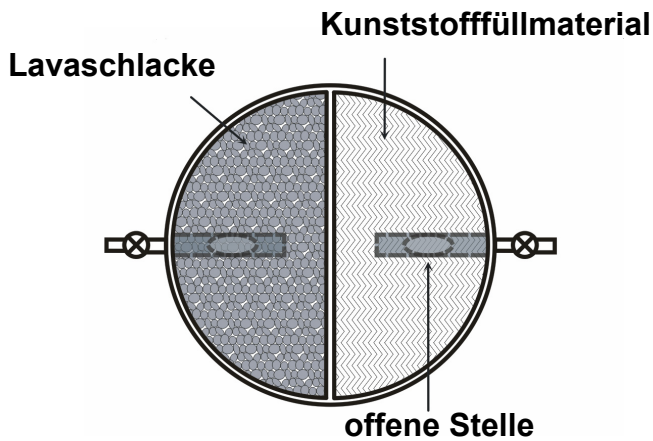


Abbildung 5.3: Schema der halbtechnischen Tropfkörperanlage

Um die Beprobung im vertikalen Profil des Tropfkörpers zu ermöglichen, wurden vier verschiedenen Probenahmestellen an jeder Tropfkörperseite auf vier verschiedenen Füllmaterialhöhen (2,7; 2,1; 1,5 und 0,9 m) eingebaut. Dazu wurden beim Einbau der Füllmaterialien auf den entsprechenden Höhen Sammelrohre eingebaut und nach außen geführt. Außerhalb des Tropfkörpers konnte dann mittel Schieber eine Probe entnommen werden. Um nur Proben aus dem mittleren Bereich der Füllmaterialien zu erhalten, waren die Rohre nur im mittleren Bereich geöffnet (Abbildung 5.4).



a) Schema der Draufsicht des Tropfkörpers

b) Seitenansicht des Tropfkörpers

Abbildung 5.4: Beprobungseinrichtungen im vertikalen Profil des Tropfkörpers

Um das Biomassewachstum innerhalb des Tropfkörpers im Laufe der Versuche zu untersuchen, wurde ein herausnehmbarer Schacht mit jeweils einem Volumen von ca. 110 l in jede Seite des Tropfkörpers eingebaut. Die Schächte waren analog zu den umgebenden Volumina gefüllt und stellten somit ein repräsentatives Teilvolumen des jeweiligen Materials dar. Sie lagen ca. 1 m über dem Gitterrost und konnten regelmäßig herausgenommen und ausgewogen werden.



a) Lavaschlacke

b) Kunststofffüllmaterial

Abbildung 5.5: Herausnehmbare Füllproben für die Lavaschlacke bzw. das Kunststofffüllmaterial

Um zu vermeiden, dass bei eventuellem Sauerstoffmangel in der Klimakammer giftige bzw. explosive Gase eine Gefahr darstellen, wurde ein Sicherheitssystem installiert. Dabei wurden CH_4 , H_2S , CO_2 und O_2 durch entsprechende Sonden online gemessen. Die Signale wurden zudem von einem stationären Gaswarngerät mit Notabschaltung verarbeitet.

5.2 Nachrechnung des halbtechnischen Tropfkörpers mit verschiedenen Bemessungsansätzen

Der halbtechnische Tropfkörper wurde aus Gründen der Vergleichbarkeit mit den in Abschnitt 4 beschriebenen Bemessungs- bzw. Modellansätzen nachgerechnet. Die Nachrechnungen (Anhang I) erfolgten anhand von dreijährigen Daten des Zulaufes zur Biologie (Ablauf Vorklämung) des LFKW. Als Bemessungsziele wurden 20 mg/l BSB_5 im Ablauf und ggf. 7 mg/l $\text{NH}_4\text{-N}$ im Ablauf angesetzt.

Tabelle 5.2 zeigt die zulässigen Raumbelastungen für den halbtechnischen Tropfkörper mit Kohlenstoffabbau und Nitrifikation. Für die Bemessung von Okey und Albertson (Metcalf und Eddy, 2003) sowie von Wolf (1987) wurden die theoretischen spezifischen Füllmaterialoberflächen verwendet (90 m^2/m^3 für die Lavaschlacke bzw. 152 m^2/m^3 für das Kunststofffüllmaterial). Als Bemessungstemperatur wurde für den Modellansatz von Wolf (1987) 12 °C verwendet.

Tabelle 5.2: Zulässige Raumbelastungen nach verschiedenen Bemessungsansätzen für den halbtechnischen Tropfkörper mit Nitrifikation unter gemäßigten Temperaturen

| Ansatz | Füllmaterial | zul. Raumbelastung |
|--|--------------|--|
| ATV-DVWK, 2001 | Lavaschlacke | 0,20 kg $\text{BSB}_5/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ bzw. 0,048 kg $\text{TKN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ |
| | Kunststoff | 0,31 kg $\text{BSB}_5/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ bzw. 0,074 kg $\text{TKN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ |
| BS EN, 2002 | Lavaschlacke | 0,05 kg $\text{NH}_4\text{-N}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ |
| U.S. EPA, 2002b | Lavaschlacke | 0,16 kg $\text{BSB}_5/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ bzw. 0,038 kg $\text{TKN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ |
| | Kunststoff | 0,29 kg $\text{BSB}_5/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ bzw. 0,069 kg $\text{TKN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ |
| Okey und Albertson (Metcalf und Eddy, 2003) | Lavaschlacke | 0,17 kg $\text{BSB}_5/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ bzw. 0,040 kg $\text{TKN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ |
| | Kunststoff | 0,28 kg $\text{BSB}_5/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ bzw. 0,067 kg $\text{TKN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ |
| Wolf (1987) | Lavaschlacke | 0,14 kg $\text{BSB}_5/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ bzw. 0,033 kg $\text{TKN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ |
| | Kunststoff | 0,23 kg $\text{BSB}_5/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ bzw. 0,055 kg $\text{TKN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ |

Die aus der Nachrechnung ermittelten Raumbelastungen liegen annähernd beieinander (Variation von ca. 25 – 30 %). Raumbelastungen zwischen 0,14 und 0,20 kg BSB₅/(m³·d) werden für den Lavaschlacke-Tropfkörper bzw. zwischen 0,23 und 0,31 kg BSB₅/(m³·d) für den Kunststoff-Tropfkörper vorgegeben. Obwohl der Modellansatz von Wolf Wassertemperaturen über 20 °C nicht berücksichtigt (siehe Tabelle 4.5), wurden die vorgegebenen Parameter auf 25 °C (eingestellte Abwassertemperatur bei den Versuchen mit hohen Temperaturen; siehe nächsten Abschnitt) interpoliert und somit die zulässigen Raumbelastungen bei dieser Temperatur ermittelt. Für eine Bemessungstemperatur von 25 °C ergibt sich nach dem Modellansatz von Wolf (1987) für die Lavaschlacke eine zulässige Raumbelastung von 0,53 kg BSB₅/(m³·d) bzw. 0,126 kg TKN/(m³·d). Für das Kunststofffüllmaterial ergibt sich 0,90 kg BSB₅/(m³·d) bzw. 0,214 kg TKN/(m³·d). Zwischen beiden Temperaturen besteht also ein Unterschied von ungefähr einem Faktor vier.

Für die reine Kohlenstoffelimination wurden die nachfolgenden Raumbelastungen (Tabelle 5.3) ermittelt. Für die modifizierte Velz-Gleichung wurden die theoretischen spezifischen Füllmaterialoberflächen eingesetzt (90 m²/m³ für die Lavaschlacke bzw. 152 m²/m³ für das Kunststofffüllmaterial). Für die NRC-Gleichung und die modifizierte Velz-Gleichung wurde eine Bemessungstemperatur von 12 °C angenommen.

Tabelle 5.3: Zulässige Raumbelastungen nach verschiedenen Bemessungsansätzen für den halbtechnischen Tropfkörper ohne Nitrifikation unter gemäßigten Temperaturen

| Ansatz | Füllmaterial | zul. Raumbelastung |
|---|--------------|---|
| ATV-DVWK, 2001 | Lavaschlacke | 0,40 kg BSB ₅ /(m ³ ·d) |
| | Kunststoff | 0,60 kg BSB ₅ /(m ³ ·d) |
| BS EN, 2002 | Lavaschlacke | 0,50 kg BSB ₅ /(m ³ ·d) |
| U.S. EPA, 2002a | Lavaschlacke | 0,40 kg BSB ₅ /(m ³ ·d) |
| NRC-Gleichung (Metcalf und Eddy, 2003) | Lavaschlacke | 0,08 kg BSB ₅ /(m ³ ·d) |
| Modifizierte Velz-Gleichung (Parker und Merril, 1984) | Kunststoff | 0,56 kg BSB ₅ /(m ³ ·d) |

Wie bereits von Rincke (1967) festgestellt geht die NRC-Gleichung von einer relativ ungünstigen Reinigungsleistung aus und spiegelt bei sehr kleinen und großen Belastungen nicht die Tendenz der von Rincke gewonnenen Daten wieder. Nach Rincke liegt die NRC-Gleichung auf der unteren Linie des von ihm gewonnen Vertrauensbereichs (Abbildung 3.2). Der Wert 0,08 kg BSB₅/(m³·d) ergibt sich unter der Annahme von einer gewünschten BSB₅-Elimination von 91% (siehe Anhang I). Wenn 80 % angenommen werden, ergibt sich eine zulässige Raumbelastung von 0,41 kg BSB₅/(m³·d).

Nach der Velz-Gleichung ist bei 25 °C Abwassertemperatur eine Raumbelastung von 1,37 kg BSB₅/(m³·d) für das Kunststofffüllmaterial zulässig. Zwischen 12 und 25 °C besteht also annähernd ein Unterschied von einem Faktor 2,5.

Insgesamt stimmen die Bemessungsansätze für Tropfkörper mit und ohne Nitrifikation überein, so dass im Folgenden nur noch Bezug auf das Arbeitsblatt 281 (ATV-DVWK, 2001) genommen wird.

5.3 Versuchsprogramm

Die Versuche wurden in drei Hauptabschnitte gegliedert:

- a) Versuche mit gemäßigten Temperaturen (Referenzphase)
- b) Versuche mit hohen Temperaturen
- c) Versuche mit versäuertem Abwasser

Im Folgenden wird die Zielsetzung jedes Versuchsabschnitts zusammengefasst:

a) Versuche mit gemäßigten Temperaturen

Als Referenz wurde der Tropfkörper nach einer Einfahrzeit im Zeitraum von 12/2005 bis 01/2006 unter normalen Abwassertemperaturen (11 – 14 °C) und Lufttemperaturen der Versuchshalle (13 – 17 °C) betrieben. Das Ziel war es, die Reinigungsleistung des Tropfkörpers bei den im Arbeitsblatt 281 (ATV-DVWK, 2001) vorgegebenen zulässigen Raumbelastungen zu überprüfen und eine Vergleichsbasis für die nächsten Phasen zu erstellen.

Die Versuche wurden in vier verschiedenen Phasen für jeweils zwei Wochen gegliedert. In der ersten bzw. zweiten Phase wurde die nach dem Arbeitsblatt 281 zurückgerechnete maximale Raumbelastung für den Kohlenstoffabbau und die Nitrifikation mit der Lavaschlacke bzw. dem Kunststofffüllmaterial angestrebt. In der dritten bzw. vierten Phase wurde die nach dem Arbeitsblatt 281 zurückgerechnete maximale Raumbelastung bei reinem Kohlenstoffabbau mit der Lavaschlacke bzw. dem Kunststofffüllmaterial angestrebt. Tabelle 5.4 stellt die angestrebte BSB₅-Raumbelastung in jeder Phase dar.

Tabelle 5.4: Angestrebte BSB₅-Raumbelastungen in jeder Ref. Phase

| Ref. Phase | I | II | III | IV |
|--|--|--|------------------------|----------------------|
| Reinigungsziel | C-Abbau und Nitrifikation (Lavaschlacke) | C-Abbau und Nitrifikation (Kunststoff) | C-Abbau (Lavaschlacke) | C-Abbau (Kunststoff) |
| kg BSB ₅ /(m ³ ·d) | 0,20 | 0,31 | 0,40 | 0,60 |
| kg TKN/(m ³ ·d) | 0,05 | 0,07 | - | - |

b) Versuche mit hohen Temperaturen

Der halbtechnische Tropfkörper wurde in diesem Versuchsabschnitt im Zeitraum von 02/2006 bis 11/2006 unter hohen Abwasser- und Lufttemperaturen betrieben. Die Abwassertemperatur wurde hierin auf 25 °C bzw. die Lufttemperatur auf 30 °C konstant gehalten. Die Versuche wurden in sechs verschiedenen Phasen von jeweils ca. 6 Wochen unterteilt. In der ersten Phase wurde die BSB₅-Raumbelastung auf der nach dem Arbeitsblatt 281 (ATV-DVWK, 2001) basierten Nachrechnung für den Kohlenstoffabbau und die Nitrifikation mit der Lavaschlacke (0,20 kg BSB₅/(m³·d)) angestrebt. In den nächsten Phasen wurde die BSB₅-Raumbelastung in Schritten von ca. 0,20 kg BSB₅/(m³·d) erhöht.

Am Ende jeder Phase wurde die Lufttemperatur systematisch zwischen ca. 17 und 32° variiert, um den Einfluss der Temperaturdifferenz zwischen Luft und Wasser auf die Durchlüftung des Tropfkörpers zu untersuchen.

c) Versuche mit versäuertem Abwasser

Vor dem Hintergrund, dass hohe Temperaturen in Kombination mit langen Fließstrecken im Kanalnetz zur Vorversäuerung des Abwassers führen könnte, wurde Essigsäure im Tropfkörperzulauf für ca. 6 Wochen zudosiert, um eine mögliche Erhöhung der organischen Säuren nachzubilden. Die Zudosierung erfolgte im Zeitraum von 01/2007 bis 02/2007. Da keine repräsentativen Daten von organischen Säuren im Zulauf von Kläranlagen in tropischen Ländern gefunden werden konnten, wurde Essigsäure mit zunehmender Konzentration im Laufe dieses Versuchsabschnitts zudosiert. Die Effekte der Erhöhung der Säuremenge im Zulauf wurden ausgewertet.

Um einen möglichen Einfluss des versäuerten Abwassers auf den Kohlenstoffabbau und die Nitrifikation zu ermitteln, wurde die auf dem Arbeitsblatt 281 (ATV-DVWK, 2001) basierende Rückrechnung für den Kohlenstoffabbau und Nitrifikation mit der Lavaschlacke angestrebt (BSB₅-Raumbelastung von ca. 0,20 kg BSB₅/(m³·d)).

d) Intensivmessphase

Eine zweiwöchige Intensivmessphase (05/2007) wurde zur Erhebung von dynamischen Daten für die numerische Simulation des halbtechnischen Tropfkörpers durchgeführt. Dafür wurde der halbtechnische Tropfkörper anhand von 2h-Mischproben im Verlauf des Tages beprobt. Im Rahmen des BMBF-Verbundprojekts „Exportorientierte Forschung & Entwicklung Teil II – Abwasserbehandlung und Wasserwiederverwendung“ wurde die Universität Emden/Oldenburg mit der Bearbeitung dieser Daten und der dynamischen Simulation beauftragt, so dass nur die Erhebung der Daten zum Rahmen der hier präsentierten Arbeit gehört. Messungen dieser Phase sind im Abschnitt 7.4 dargestellt.

In dieser Phase wurde der Tropfkörper mit niedriger Raumbelastung betrieben, so dass Kohlenstoffabbau und Nitrifikation stattfanden. Es wurde eine BSB₅-Raumbelastung von 0,20 kg BSB₅/(m³·d) für Kohlenstoffabbau und Nitrifikation in der Lavaschlacke eingestellt.

5.4 Analytik und Untersuchungsmethoden

5.4.1 Analytik des Zu- und Ablaufes (Tagesmittel)

Im Zulauf und Ablauf des halbtechnischen Tropfkörpers wurden die folgenden Parameter gemessen:

- Zulauf: CSB_{hom} , CSB_{mf} , BSB_5 , TKN, NO_3-N , NO_2-N , P_{ges} , AFS, pH, $SK_{4,3}$ und $H_{Ac,äq}$
- Ablauf (Lavaschlacke und Kunststofffüllmaterial): CSB_{hom} , CSB_{mf} , BSB_5 , NH_4-N , NO_3-N , NO_2-N , PO_4-P , AFS, pH und $SK_{4,3}$

Die Proben im Zulauf und an beiden Abläufen wurden von automatischen Probenehmern als 24-h-Mischproben entnommen. Die Zulaufproben wurden aus dem Ablauf der Vorklärung des Lehr- und Forschungsklärwerks der Universität Stuttgart entnommen. Die Ablaufproben wurden aus den jeweiligen Abläufen der halbtechnischen Nachklärungen entnommen. Die Analysen erfolgten gemäß den im Anhang III beschriebenen Methoden.

5.4.2 Analytik im vertikalen Profil des Tropfkörpers

Um die Abbauvorgänge im vertikalen Profil des Tropfkörpers zu untersuchen, wurden an einzelnen Tagen Proben aus dem Drehsprenger, den an verschiedenen Tropfkörperhöhen installierten Probenahmestellen und dem Tropfkörperablauf von jedem Füllmaterial entnommen und analysiert. Die Proben wurden als Stichproben in der Regel zwischen 8:00 und 9:30 Uhr entnommen.

Für die Auswertung des Kohlenstoffabbaus wurden die CSB -Werte der membranfiltrierten Proben analysiert (CSB_{mf}), da die Feststoffmengen in den Proben stark schwankten. Zudem wurden die Parameter NH_4-N , NO_3-N und NO_2-N bestimmt.

5.4.3 Analytik im Tagesverlauf

Messungen im Tagesverlauf wurden während der zweiwöchigen Intensivmessphase vorgenommen (siehe Abschnitt 5.3). Die folgenden Parameter wurden im Zulauf und im Ablauf des halbtechnischen Tropfkörpers gemessen:

- Zulauf: CSB_{hom} , CSB_{mf} , TKN, NH_4-N , NO_3-N , NO_2-N , P_{ges} , AFS und $SK_{4,3}$
- Ablauf (Lavaschlacke und Kunststofffüllmaterial): CSB_{hom} , CSB_{mf} , NH_4-N , NO_x-N , NO_2-N , $P_{ges,mf}$, AFS und $SK_{4,3}$

Es wurden von automatischen Probenehmern im Zulauf und in beiden Abläufen des halbtechnischen Tropfkörpers 2h-Mischproben entnommen. Die Auswertung von NO_x-N und NH_4-N erfolgte über online Hach Lange-Analysern.

5.4.4 Ermittlung der Tropfzeit

Die Bestimmung der Tropfzeit erfolgt normalerweise über Tracermessungen. Das Abwasser wird im Tropfkörperzulauf mit einem Tracer markiert und das Antwortsignal wird im Tropfkörperablauf gemessen. Eine häufige verwendete Methode besteht in der Anwendung des Dirac-Impulses zur Markierung des Abwassers (Abbildung 5.6).

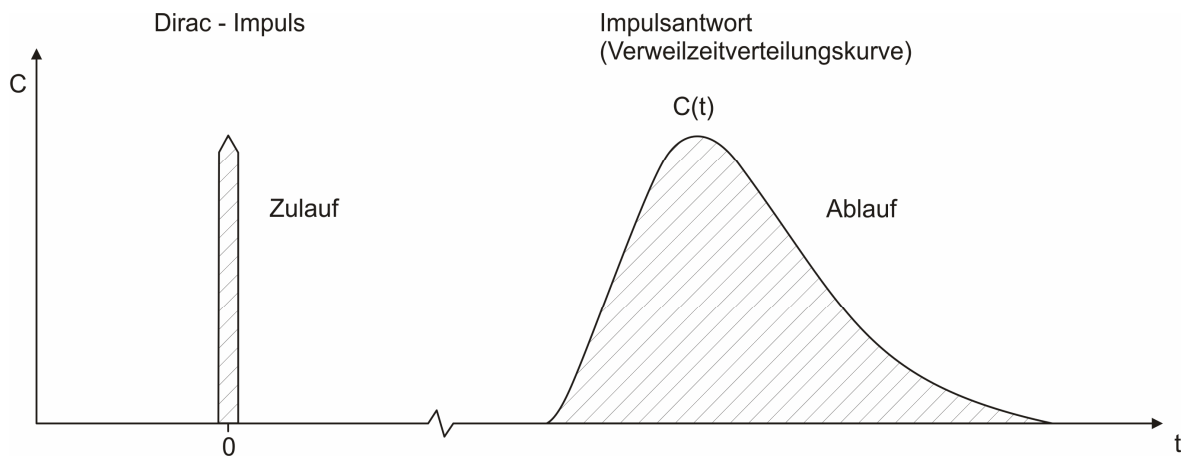


Abbildung 5.6: Dirac-Impuls und Antwortsignal (nach Eckenfelder und Barnhart, 1963)

Als Tracer werden in der Regel Salze oder Farbstoffe verwendet. Wichtig dabei ist, dass der Tracer während der Fließstrecke nicht adsorbiert bzw. abgebaut und nachweisbar im Tropfkörperablauf ist. In dieser Arbeit wurde dafür Kochsalz (NaCl) mit einer Konzentration von ca. 6 – 6,5 g/l verwendet. Das Salz wurde an der Saugseite der Zulaufpumpe für eine Minute zudosiert. Die Leitfähigkeit des Abwassers am Drehsprenger wurde dann während ca. 5 min. alle 20 s, die Leitfähigkeit der Tropfkörperabläufe während 50 min. alle 20 s gemessen.

Das Antwortsignal des Dirac-Impulses kann mit der folgenden Verteilungsfunktion normiert werden:

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t) \cdot dt}$$

Die mittlere Tropfzeit kann wie folgt hergeleitet werden:

$$\zeta = \int_0^{\infty} E(t) \cdot t \cdot dt$$

Aus der Verteilungsfunktion und der mittleren Tropfzeit ist die Bestimmung der Varianz σ^2 möglich:

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} (t - \zeta)^2 \cdot E(t) \cdot dt$$

Oder in der normalisierten Form:

$$\sigma_0^2 = \frac{\sigma^2}{\zeta^2}$$

Zur Charakterisierung der Dispersion durch die axiale Vermischung des Wassers wird in der Literatur häufig die Dispersionskennzahl $D/ul = 1 / \text{Bodensteinzahl}$ (Rüdiger, 1993) verwendet:

$$\sigma_0^2 = 2 \cdot \left(\frac{D}{ul} \right) - 2 \cdot \left(\frac{D}{ul} \right)^2 \cdot \left(1 - e^{-\frac{ul}{D}} \right)$$

Wenn $D/ul \rightarrow 0$ verlassen alle Fluidteilchen den Tropfkörper in der Zeit ζ . Es wird im diesen Fall von einem idealen Pfropfenströmungsreaktor gesprochen. Je höher die Dispersionszahl ist, desto größer ist die axiale Vermischung der Fluidteilchen. Für $D/ul \rightarrow \infty$ wird von einem vollständig durchmischten Reaktor gesprochen.

5.4.5 Erfassung des Abtropfgewichts

Die Biofilmdicke konnte durch die regelmäßige Erfassung des Abtropfgewichts der einzelnen Füllmaterialproben (siehe Abschnitt 5.1) eingeschätzt werden. Jede Füllmaterialprobe (ein Stück für jedes Füllmaterial) hatte ein Volumen von ca. 110 l. Das Herausnehmen der Proben erfolgte für das Kunststofffüllmaterial manuell, für die Lavaschlacke mit einem Flaschenzugssystem. Das Gewicht wurde erst abgelesen, nachdem die Füllmaterialproben vollständig abgetropft waren.

5.4.6 Luftströmungsmessungen

Um die Luftströmung durch den Tropfkörper zu beurteilen, wurden die Strömungsgeschwindigkeiten (m/s) in den Luftöffnungen an beiden Tropfkörperseiten mit einem Messgerät (Testo 445) mit einer Heizkugelspitze gemessen. Es wurde ein 1 min-Mittelwert abgelesen und ein Gesamtmittelwert der verschiedenen Luftöffnungen gebildet.

Angenommen wurde, dass die Luftströmung in jedem Rohr ein laminares Profil aufweist und die gemessene Geschwindigkeit (in der Mitte der Luftöffnungen) der maximalen Geschwindigkeit (v_{\max}) dieses Profils entspricht. Der Einfluss der Heizkugelspitze auf das Profil wurde nicht berücksichtigt.

Für ein laminares Profil ist die mittlere Geschwindigkeit gleich $v_{\max} / 2$ (Sigloch, 2005). Anhand des Durchmessers jeder Öffnung und der Querschnittsfläche des Tropfkörpers wurden die Geschwindigkeiten (m/s) in Volumen pro Querschnittfläche umgerechnet ($l/(m^2 \cdot s)$).

5.4.7 Olfaktometrische Messungen

Um die Intensität der Geruchsemission des Tropfkörpers einzuschätzen, wurden Luftproben aus den am unteren Bereich des Tropfkörpers installierten Luftöffnungen

entnommen und in Anlehnung an die Norm DIN EN 13725 (2003) ausgewertet. Jede Probe wurde mit einem Vakuum-Probenehmer als Stichprobe aus einer der 10 Luftrohre von jedem Füllmaterial entnommen. Die Probe wurde dann in einem geruchsneutralen Kunststoffbeutel mit ca. 2 – 3 Liter Volumen zu einem Panel mit 4 Personen gebracht und analysiert.

Die Geruchsstoffkonzentrationen wurden ermittelt, indem die Probe in unterschiedlichen Konzentrationen durch Verdünnung mit synthetischer Luft (20,5 % O₂ in N₂; frei von Kohlenwasserstoff) dargeboten wurde, um den Verdünnungsfaktor zu ermitteln, bei dem in 50 % der Fälle ein Geruch wahrgenommen wird. Die Geruchsstoffkonzentration an der Wahrnehmungsschwelle beträgt per Definition eine Europäische Geruchseinheit pro Kubikmeter (GE_E/m³). Die Geruchsstoffkonzentration wird dann als Vielfaches der Wahrnehmungsschwelle ausgedrückt.

Da die Beziehung zwischen dem Reiz und der wahrgenommenen Intensität logarithmisch ist (DIN EN, 2003), können die Geruchsstoffkonzentrationen in einer Einheit ausgedrückt werden, die weniger die Geruchsstoffkonzentration als die Geruchsintensität widerspiegelt. Der zehnfache dekadische Logarithmus (log₁₀) der Geruchskonzentration wird dafür verwendet und die Ergebnisse lassen sich so in Geruchsdezibel (dBod) darstellen.

6 Versuchsergebnisse mit gemäßigten Temperaturen (Referenzphase)

6.1 Betriebseinstellungen und Abwasserbeschaffenheit

Vier verschiedene BSB₅-Raumbelastungen wurden für jeweils ca. zwei Wochen wie im Abschnitt 5.3 beschrieben eingestellt. Angestrebt wurden die empfohlenen Raumbelastungen nach der auf dem Arbeitsblatt 281 (ATV-DVWK, 2001) basierten Nachrechnung der Versuchsanlage für den Kohlenstoffabbau und die Nitrifikation bzw. nur den Kohlenstoffabbau für beide Füllmaterialien.

Während der Referenzphase waren die Einrichtungen für eine separate Rezirkulation noch nicht fertig, so dass das Rückführwasser je nach Einstellung entweder aus dem Ablauf des Lavaschlacke- oder des Kunststoff-Tropfkörpers rezirkuliert wurde. Aus diesem Grund wurde in jeder Phase nur das Füllmaterial mit dem zugehörigen Rückführwasser ausgewertet. Tabelle 6.1 stellt die Betriebseinstellungen des halbtechnischen Tropfkörpers in jeder Phase dar.

Tabelle 6.1: Betriebseinstellungen im Mittelwert für den halbtechnischen Tropfkörper in der Referenzphase

| Parameter | Einheit | Ref. Phase I | Ref. Phase II | Ref. Phase III | Ref. Phase IV |
|----------------|--|--|--|------------------------|----------------------|
| Reinigungsziel | - | C-Abbau und Nitrifikation (Lavaschlacke) | C-Abbau und Nitrifikation (Kunststoff) | C-Abbau (Lavaschlacke) | C-Abbau (Kunststoff) |
| Raumbelastung | kg BSB ₅ /(m ³ ·d) | 0,18 | 0,29 | 0,30 | 0,49 |
| | kg TKN/(m ³ ·d) | 0,050 | 0,074 | 0,100 | 0,142 |
| RV | % | 100 | 110 | 90 | 60 |
| q _A | m/h | 0,3 | 0,5 | 0,6 | 0,7 |
| SK | mm | 8 | 12 | 12 | 11 |

Die Lufttemperaturen während der Referenzphase waren trotz des Winters nicht sehr niedrig, da der Tropfkörper in der Versuchshalle des LFKW installiert war. Die durchschnittlichen Lufttemperaturen lagen zwischen 13 und 17 °C, die Wassertemperaturen während dieser Periode lagen zwischen 11 und 14 °C.

Die Abwasserzusammensetzung blieb während der Versuche relativ konstant. Der mittlere BSB₅ im Zulauf betrug 214 mg/l. Das mittlere BSB₅/TKN-Verhältnis lag bei 3,6.

6.2 Reinigungsleistung im Tagesmittel

Für die Bewertung der Referenzphasen I und II werden die Ablaufwerte des Lehr- und Forschungsklärwertes der Universität Stuttgart (LFKW) von derselben Periode als Vergleichsbasis genutzt. Das LFKW behandelt das gleiche Abwasser wie der halbertechnische Tropfkörper und ist als Belebungsanlage zur Stickstoffelimination ausgelegt. Somit ist ein Vergleich der erzielten Reinigungsleistung bedingt möglich.

Tabelle 6.2 stellt die entsprechenden Analysenergebnisse für die Ref. Phasen I bzw. II (Kohlenstoffabbau und Nitrifikation für die Lavaschlacke bzw. das Kunststoffmaterial) dar. Die CSB-Elimination wurde nach der Formel $(C_{CSB,ZU} - C_{CSBmf,AB}) \cdot 100 / C_{CSB,ZU}$ bzw. die NH_4 -N-Elimination nach der Formel $(TKN_{ZU} - NH_4-N_{AB} - 2 \text{ mg/l } N_{org,AB}) / TKN_{ZU}$ errechnet.

Tabelle 6.2: Raumbelastungen und Ablaufmittelwerte des halbertechnischen Tropfkörpers und des LFKW für die Ref. Phasen I und II

| Parameter | Ref. Phase I (Lavaschlacke) | | Ref. Phase II (Kunststoff) | |
|---|--------------------------------|------|-------------------------------|------|
| | Tropfkörper | LFKW | Tropfkörper | LFKW |
| Reinigungsziel | C-Abbau und Nitrifikation | | C-Abbau und Nitrifikation | |
| Raumbelastung in kg $BSB_5/(m^3 \cdot d)$ | 0,18 | - | 0,29 | - |
| Raumbelastung in kg $TKN/(m^3 \cdot d)$ | 0,050 | - | 0,074 | - |
| CSB _{mf} -Ablaufwert* in mg/l | 40 | 25 | 40 | 28 |
| CSB-Elimination in % | 87 | 92 | 90 | 93 |
| NH_4 -N-Ablaufwert in mg/l | 10 | 12 | 8 | 7 |
| NH_4 -N-Elimination in % | 73 | 69 | 83 | 84 |

* Mikrofiltriert beim LFKW (15 – 20 µm), membranfiltriert (0,45 µm) beim Tropfkörper

Die erreichten BSB_5 -Raumbelastungen waren in der Ref. Phasen I und II durchschnittlich nur geringfügig kleiner als die angestrebten Werte (Abschnitt 5.3).

Im Vergleich zum LFKW lagen sowohl die NH_4 -N-Ablaufwerte als auch die NH_4 -N-Eliminationen in jeder Phase eng beieinander. Die relativ niedrigen NH_4 -N-Eliminationsleistungen beider Anlagen können wahrscheinlich auf Hemmstoffe im Zulauf des LFKW zurückgeführt werden. Schon in den letzten Wintern kam es zu erhöhten NH_4 -N-Ablaufkonzentrationen auf dem LFKW. Die Ursache konnte bisher noch nicht gefunden werden.

Die CSB-Ablaufwerte des Tropfkörpers sind höher als diejenigen des LFKW. Dies ist jedoch typisch für Tropfkörper. Im Leistungsvergleich kommunaler Kläranlagen in Baden-Württemberg verglich Schwentner (2005) Ablaufwerte von verschiedenen einstufigen Verfahren und stellte fest, dass Tropfkörper im Vergleich zu Belebungsanlagen statistisch höhere CSB-Ablaufwerte aufweisen. 50% der Belebungsanlagen unterschreiten CSB-Ablaufwerte von 20 mg/l, während der Median von Tropfkörperanlagen bei 40 mg/l liegt.

Die Analysenergebnisse für die Ref. Phasen III und IV werden in Tabelle 6.3 zusammen dargestellt.

Tabelle 6.3: Raumbelastungen und Ablaufmittelwerte des halbtechnischen Tropfkörpers für die Ref. Phasen III und IV

| Parameter | Ref. Phase III (Lavaschlacke) | Ref. Phase IV (Kunststoff) |
|---|----------------------------------|-------------------------------|
| Reinigungsziel | C-Abbau | C-Abbau |
| Raumbelastung in kg BSB ₅ /(m ³ ·d) | 0,30 | 0,49 |
| Raumbelastung in kg TKN/(m ³ ·d) | 0,100 | 0,142 |
| CSB _{mf} -Ablaufwert in mg/l | 44 | 37 |
| CSB-Elimination in % | 91 | 89 |
| NH ₄ -N-Ablaufwert in mg/l | 17,0 | 16 |
| NH ₄ -N-Elimination in % | 66 | 61 |

Die erreichten durchschnittlichen BSB₅-Raumbelastungen lagen unterhalb der angestrebten Werte (Abschnitt 5.3). Die CSB_{mf}-Ablaufwerte von der Ref. Phasen III und IV wiesen keinen wesentlichen Unterschied im Vergleich zu den Ref. Phasen I und II auf. Obwohl nur der Kohlenstoffabbau angestrebt wurde, wurden immer noch relativ hohe NH₄-N-Eliminationen erreicht (> 60%), d.h. ein großes Volumen des Tropfkörpers wird noch zur Nitrifikation genutzt.

Da teilweise erhebliche Feststoffmengen mit dem Ablauf als abfiltrierbare Stoffe aus dem System abgezogen wurden, wurde die Überschussschlammproduktion aus der Summe des Überschussschlammes und der abfiltrierbaren Stoffe im Auslauf ermittelt. Insgesamt wurde während des ganzen Versuchsabschnitts von jedem Füllmaterialien genau dieselbe Menge produziert (1,0 g ÜS / g CSB_{elim}).

Wöchentliche Messungen der Luftströmung im halbtechnischen Tropfkörper zeigten, dass der Lavaschlacke-Tropfkörper im Mittel mit 2,2 l/(m²·s) bzw. der Kunststoff-Tropfkörper mit 2,4 l/(m²·s) belüftet wurde.

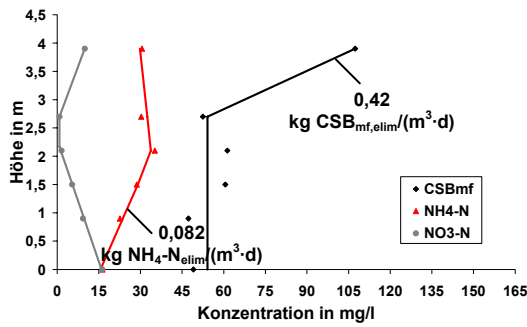
6.3 Reinigungsleistung im vertikalen Profil des Tropfkörpers

Wie im Abschnitt 5.4.2 beschrieben, wurden in jeder Phase Proben im vertikalen Profil des halbtechnischen Tropfkörpers entnommen und analysiert. Es wurde eine Profilmessung pro Phase durchgeführt, die gewonnenen Punkte wurden mit linearen Regressionen interpoliert.

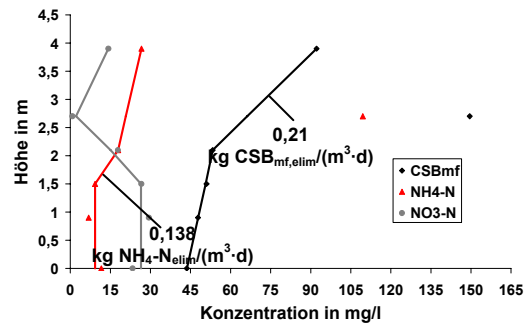
Es war zu beobachten, dass sich die CSB_{mf} bzw. NH₄-N-Werte über die Fließstrecke aufgrund von Rücklösungen (Autolyse der Biomasse) häufig erhöhten. Einige Werte waren hierbei wesentlich höher als die Werte am Drehsprenger. Um zu prüfen, ob dieser Anstieg auf lokale Versäuerungen zurückzuführen war, wurden die Mengen an organische

Säuren als Essigsäure ($H_{Ac,äq}$) mitbestimmt. In der Tat konnten in der Regel hohe Mengen an $H_{Ac,äq}$ (bis ca. 80 mg/l) in den Proben mit stark erhöhten CSB_{mf} - bzw. NH_4 -N-Werten festgestellt werden. Da diese Werte nicht mit den anderen Werten korrelierten, wird hierbei davon ausgegangen, dass es sich um lokale Versäuerungs Vorgänge aufgrund langer Schlammaufenthaltszeiten handelt, d.h. die Erhöhung der Werte ist für den ganzen Tropfkörper nicht repräsentativ. Aus diesem Grund wurden diese Werte bei den linearen Korrelationen vernachlässigt. In diesen Fällen kann sich der Verlauf der interpolierten Geraden vom wirklichen Verlauf unterscheiden.

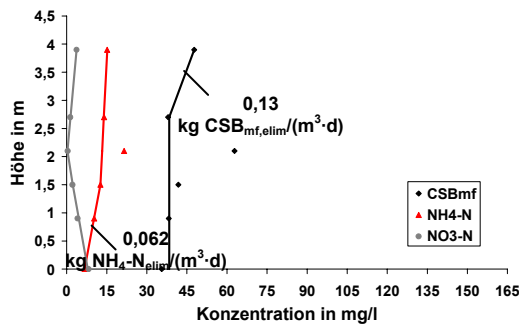
Abbildung 6.1 stellt die Profilmessungen für das jeweilige Füllmaterial in jeder Phase dar. Dabei wurden die durchschnittlichen erreichten BSB_5 -Raumbelastungen (als „Mittel“ bezeichnet) in den jeweiligen Phasen bzw. die während der Messung laufenden BSB_5 -Raumbelastungen (als „momentan“ bezeichnet) in $kg/(m^3 \cdot d)$ angegeben. Die momentanen BSB_5 -Raumbelastungen wurden anhand der CSB_{mf} -Werte am Drehsprenger ermittelt. Das Verhältnis BSB_5/CSB_{mf} wurde mit 1,6 (Mittelwert während der Versuche) angesetzt. Da die Werte für NO_2 -N bei allen Messungen selten 1 mg/l überschritten und wenig aussagekräftig waren, wurde auf ihre Darstellung verzichtet.



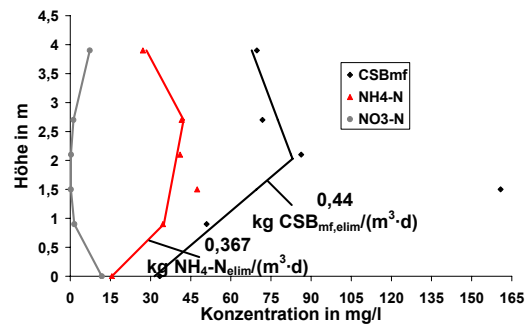
Ref. Phase I (Lavaschlacke):
 $B_{R,BSB} = 0,18$ (Mittel) bzw. $0,40$ (momentan)



Ref. Phase II (Kunststoff):
 $B_{R,BSB} = 0,29$ (Mittel) bzw. $0,37$ (momentan)



Ref. Phase III (Lavaschlacke):
 $B_{R,BSB} = 0,30$ (Mittel) bzw. $0,31$ (momentan)



Ref. Phase IV (Kunststoff):
 $B_{R,BSB} = 0,49$ (Mittel) bzw. $0,52$ (momentan)

Abbildung 6.1: Abbau im vertikalen Profil des halbtechnischen Tropfkörpers mit gemäßigten Luft- und Abwassertemperaturen (die angegebenen Raumbelastungen beziehen sich auf die durchschnittlichen erreichten Werte in den jeweiligen Phasen („Mittel“) bzw. die während der Messung laufenden BSB₅-Raumbelastungen („momentan“))

Aus der Abbildung der Ref. Phase I und II ist festzustellen, dass der Kohlenstoffabbau bei beiden Füllmaterialien hauptsächlich im oberen Bereich des Tropfkörpers erfolgte. In diesem Bereich ist beim Lavaschlacke-Tropfkörper eine geringfügige Erhöhung der NH₄-N-Konzentrationen zu beobachten. Diese kann auf Ammonifikation organischen Stickstoffs zurückgeführt werden. Die Nitrifikation beginnt erwartungsgemäß erst nach weitestgehender Kohlenstoffelimination. Beim Kunststoff-Tropfkörper war keine Nitrifikation in der unteren Tropfkörperschicht festzustellen.

In den Profilmessungen der Ref. Phase III und IV konnte bei beiden Füllmaterialien beobachtet werden, dass die Nitrifikanten in die untere Tropfkörperschicht verschoben wurden. Der Anstieg der CSB_{mf}-Werte über die Fließstrecke des Kunststoff-Tropfkörpers in der oberen Schicht deutete auf Rücklösungsvorgänge aufgrund Autolyse hin. In der unteren Schicht jedoch waren die Umsatzraten so hoch, dass der schlechte Abbau im oberen Bereich ausgeglichen wurde.

Bei jeder Messung ist festzustellen, dass im oberen Bereich $\text{NO}_3\text{-N}$ eliminiert wird. Am Beispiel der Phase I wurde im obersten Tropfkörpermeter ca. 10 mg $\text{NO}_3\text{-N/l}$ und 28 mg $\text{CSB}_{\text{mf}}/\text{l}$ eliminiert. Geht man davon aus, dass 1,5 % der CSB -Konzentration als Stickstoff in die Biomasse inkorporiert wird (3 % der BSB_5 -Konzentration wird vom Arbeitsblatt 281 (ATV-DVWK, 2001) vorgegeben), kann die $\text{NO}_3\text{-N}$ -Elimination (ca. 30 % der CSB -Konzentration) nicht nur auf Inkorporation zurückgeführt werden. Stattdessen deutet sie auf Denitrifikationsvorgänge im oberen Bereich des Tropfkörpers hin.

7 Versuchsergebnisse mit hohen Temperaturen

7.1 Betriebseinstellungen und Abwasserbeschaffenheit

Die Versuche mit hohen Abwasser- und Lufttemperaturen können in sechs Phasen gegliedert werden. Die BSB₅-Raumbelastungen wurden von Phase zu Phase wie im Abschnitt 5.3 beschrieben allmählich erhöht. Tabelle 7.1 stellt die eingestellten Betriebsparameter im Mittel für jede Phase dar.

Tabelle 7.1: Betriebseinstellungen im Mittelwert für den halbertechnischen Tropfkörper pro Phase

| Phase | Zulauf | | Lavaschlacke | | | Kunststoff | | |
|-------|---|-------------------------------|----------------|-----|----|----------------|-----|----|
| | B _{R,BSB} | B _{R,TKN} | q _A | RV | SK | q _A | RV | SK |
| | kg BSB ₅ /(m ³ ·d) | kg TKN/(m ³ ·d) | m/h | % | mm | m/h | % | mm |
| I | 0,15 | 0,042 | 0,7 | 280 | 8 | 0,7 | 310 | 9 |
| II | 0,24 | 0,072 | 0,6 | 80 | 6 | 0,6 | 90 | 6 |
| III | 0,45 | 0,120 | 0,8 | 90 | 7 | 0,8 | 90 | 7 |
| IV | 0,62 | 0,159 | 1,0 | 90 | 9 | 1,0 | 90 | 9 |
| V | 0,77 | 0,206 | 1,3 | 70 | 21 | 1,3 | 70 | 20 |
| VI | 0,98 | 0,257 | 0,9 | 0 | 29 | 0,9 | 0 | 29 |

Die Spülkraft wurde in den Phasen V und VI aufgrund der Verschlämmung des Tropfkörpers wesentlich erhöht (siehe Abschnitt 7.5.1). Wegen den hohen hydraulischen Anforderungen an die Pumpen wurde der Ablauf in der Phase VI nicht rezirkuliert.

Die Erhöhung der BSB₅-Raumbelastung wurde insbesondere durch den Anstieg der Fördermenge der Zulaufpumpe erreicht. Allerdings muss klar gestellt werden, dass sich die BSB₅-Werte im Zulauf während der Versuche allmählich erhöht haben. In Abbildung 7.1 wurden die BSB₅-Werte und die BSB₅/TKN-Verhältnisse im Laufe der Versuche aufgetragen.

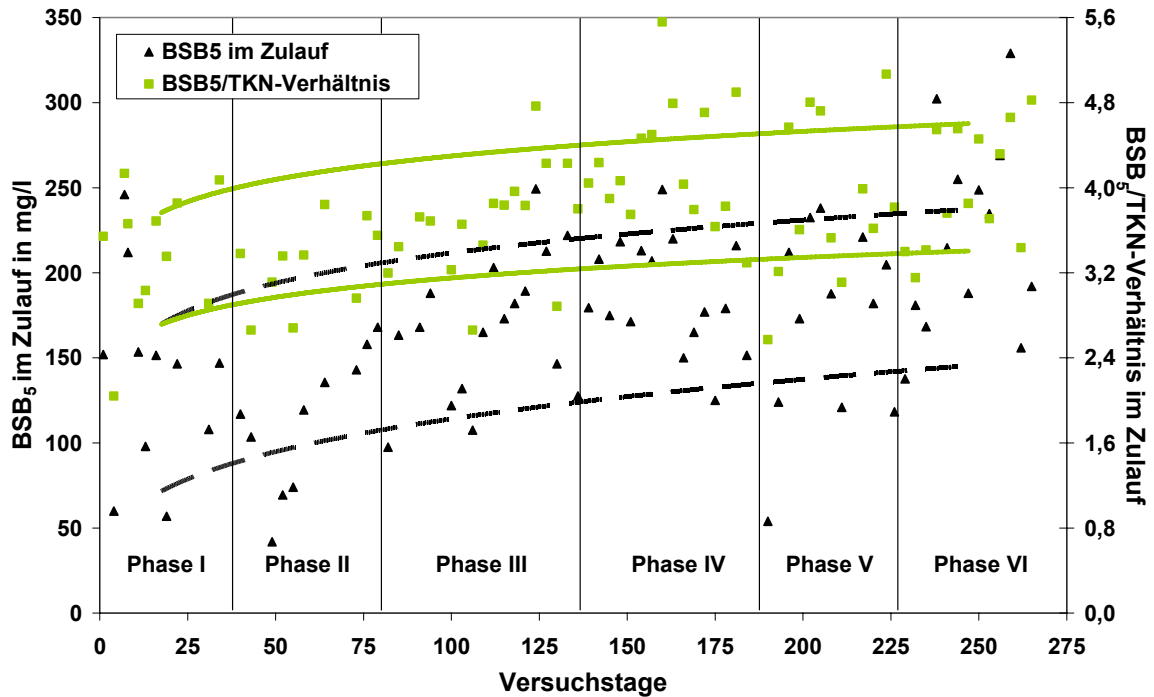


Abbildung 7.1: BSB₅-Zulaufkonzentrationen und BSB₅/TKN-Verhältnisse im Laufe der Versuche

Über die Erhöhung der BSB₅-Zulaufwerte hinaus ist das BSB₅/TKN-Verhältnis von Phase zu Phase ebenso höher geworden. Der Mittelwert variierte zwischen 3,3 und 4,2 zwischen den Phasen I und VI. Der Mittelwert des ganzen Versuchsabschnitts erreichte 3,8. Der Einfluss des Anstiegs der BSB₅-Werte und des BSB₅/TKN-Verhältnisses auf die Reinigungsleistung des halbtechnischen Tropfkörpers wird zusammen mit der Darstellung der Ergebnisse in den nächsten Abschnitten berücksichtigt.

7.2 Reinigungsleistung im Tagesmittel

7.2.1 BSB₅- und CSB-Elimination

Die Erhöhung der Zulaufmenge zur Anpassung der gewünschten Raumbelastungen hat die Zunahme der hydraulischen Belastung der Nachklärbecken zur Folge. Der Anstieg der AFS- und folglich der BSB₅- bzw. CSB-Werte im Ablauf konnte deshalb nicht vermieden werden. Außerdem zeigten die Nachklärbecken von jedem Füllmaterial trotz ähnlicher Flächenbeschickung nicht immer dieselbe Leistungsfähigkeit auf (Abbildung 7.2).

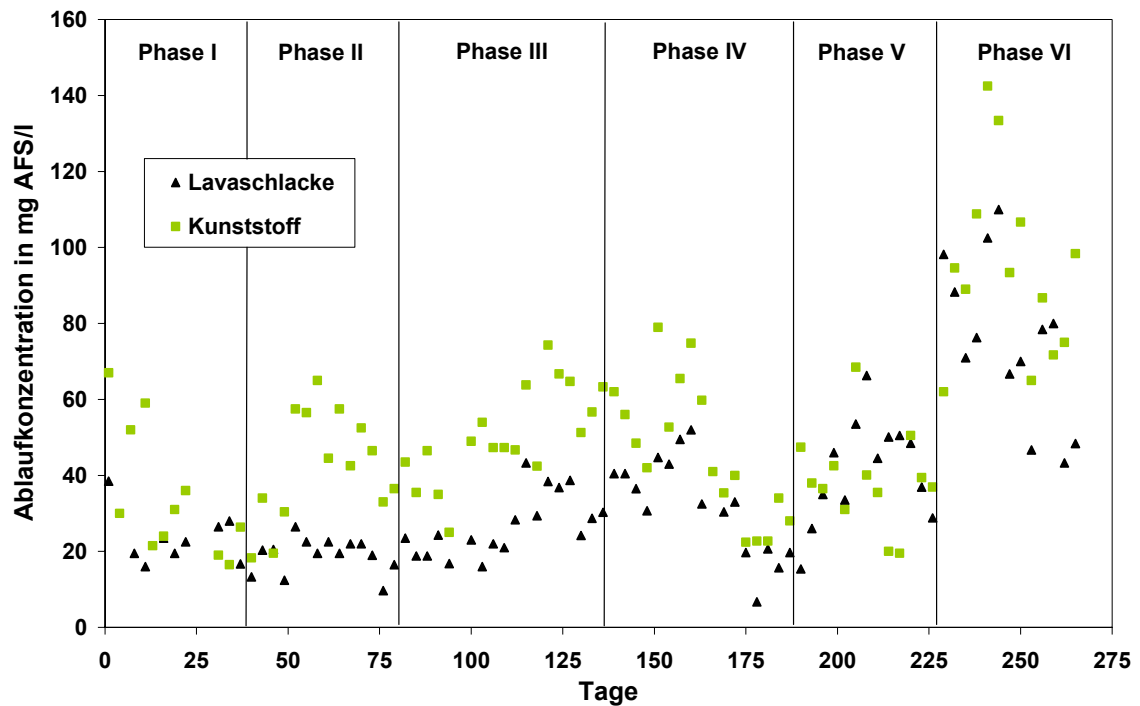


Abbildung 7.2: AFS-Konzentrationen im Ablauf des halbtechnischen Tropfkörpers im Laufe der Versuche

Um dieses Problem zu umgehen, wurden die BSB_5 -Ablaufkonzentrationen auf 20 mg AFS/l im Ablauf normiert. Die BSB_5 -Ablaufwerte der Proben mit AFS-Konzentrationen > 20 mg/l wurden mittels eines Korrekturfaktors (BSB_5/AFS) korrigiert. Dieser Faktor wurde anhand von der CSB/AFS - und CSB/BSB_5 -Verhältnisse für jeden Messpunkt errechnet.

In Abbildung 7.3 wurde die BSB_5 -Elimination ($(BSB_{5,ZU} - BSB_{5,AB}) \cdot 100 / BSB_{5,ZU}$) gegen die BSB_5 -Raumbelastung aufgetragen.

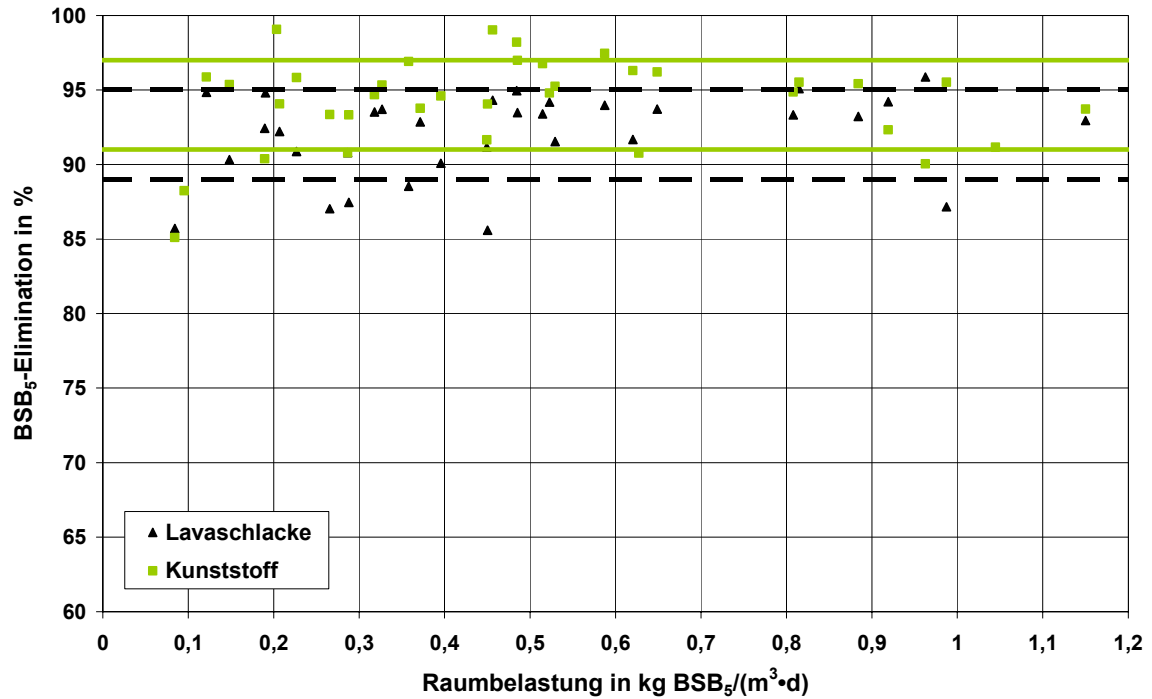


Abbildung 7.3: BSB₅-Elimination für den halbtechnischen Tropfkörper in Abhängigkeit von der BSB₅-Raumbelastung (Ablaufwerte auf 20 mg/l AFS normiert)

Ein Einfluss der Erhöhung der BSB₅-Raumbelastung konnte zwischen 0,08 und 1,20 kg BSB₅/(m³·d) für beide Füllmaterialien nicht festgestellt werden. Der Vertrauensbereich der BSB₅-Abbauleistung (Mittelwert ± Standardabweichung) umfasste für die Lavaschlacke den Bereich zwischen 89 und 95 % bzw. für das Kunststofffüllmaterial zwischen 91 und 97%. Da die Anzahl an Messpunkten im oberen Bereich der Raumbelastung gering ist, kann nicht zwingend von einem konstanten Verlauf der BSB₅-Elimination im Vertrauensbereich ausgegangen werden.

Die BSB₅-Absolutwerte im Ablauf des Tropfkörpers sind aus Abbildung 7.4 zu entnehmen.

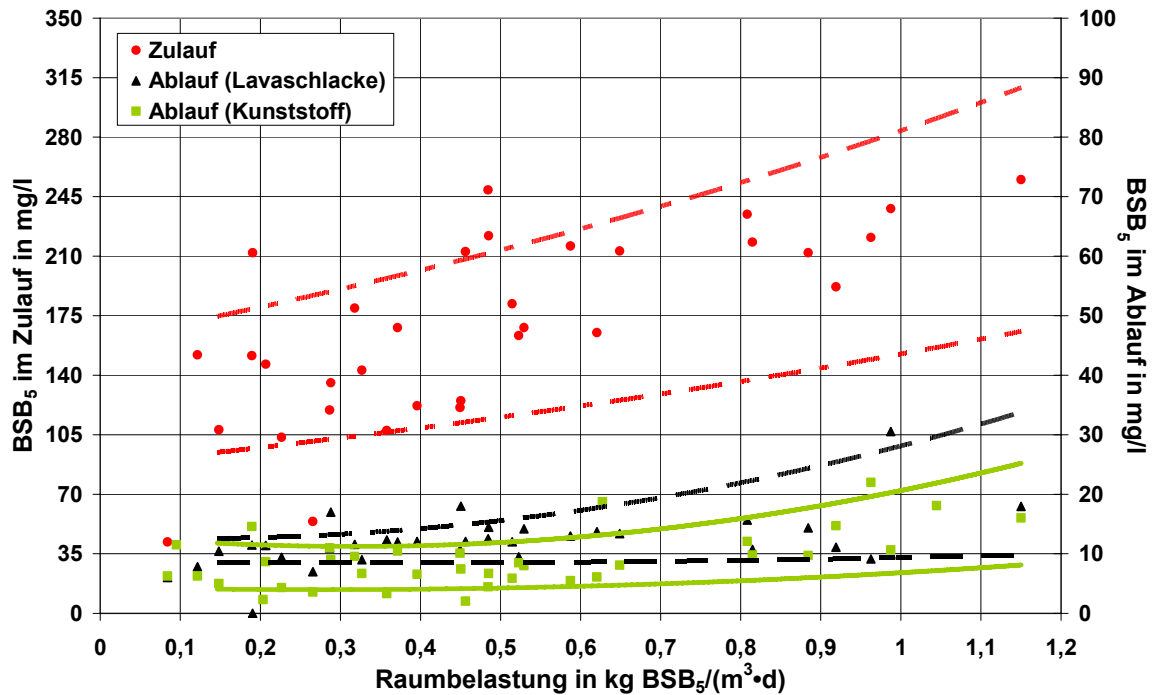


Abbildung 7.4: BSB₅ im Zu- und Ablauf des halbtechnischen Tropfkörpers in Abhängigkeit von der BSB₅-Raumbelastung (Ablaufwerte auf 20 mg/l AFS normiert)

Ein allmählicher Anstieg der BSB₅-Ablaufwerte mit zunehmender Raumbelastung für beide Füllmaterialien ist festzustellen. Da die in Abbildung 7.4 aufgezeichneten BSB₅-Eliminationen trotz der Erhöhung der Raumbelastung nahezu konstant blieben, kann der Anstieg der Ablaufkonzentrationen auf die Zunahme der Zulaufkonzentrationen zurückgeführt werden.

Nichtsdestotrotz ist festzustellen, dass bis zu einer Raumbelastung von 0,70 kg BSB₅/(m³·d) für die Lavaschlacke bzw. 0,97 kg BSB₅/(m³·d) für das Kunststofffüllmaterial BSB₅-Werte von 20 mg/l im Ablauf sicher erreicht wurden. Gegenüber den Empfehlungswerten des Arbeitsblattes 281 (ATV-DVWK, 2001), welches von Raumbelastungen höher als 0,40 kg BSB₅/(m³·d) für die Lavaschlacke bzw. 0,80 kg BSB₅/(m³·d) für das Kunststofffüllmaterial abrät, sind diese Raumbelastungen relativ hoch.

Die Auswertung der CSB-Elimination wurde anhand von filtrierten Ablaufproben (CSB_{mf}) durchgeführt, so dass nur die gelöste Phase berücksichtigt wurde. In Abbildung 7.5 wurde die CSB-Elimination $((C_{CSB,ZU} - C_{CSBmf,AB}) \cdot 100 / C_{CSB,ZU})$ gegen die BSB₅-Raumbelastung aufgetragen.

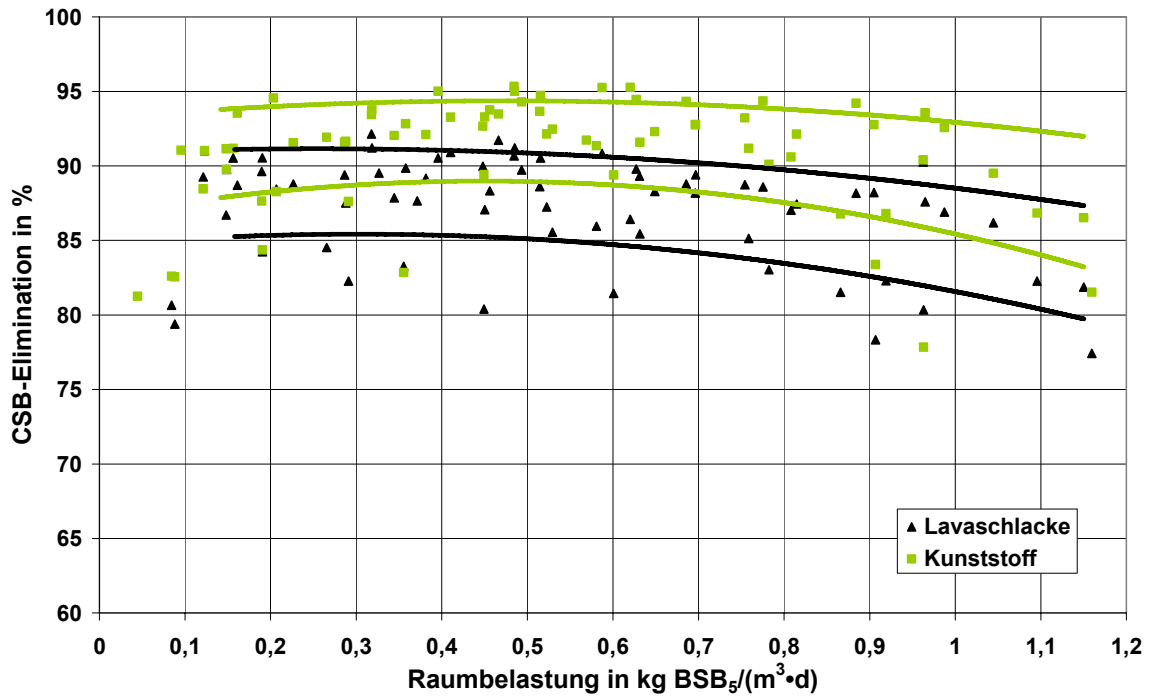


Abbildung 7.5: CSB-Elimination für den halbtechnischen Tropfkörper in Abhängigkeit von der BSB₅-Raumbelastung

Anders als bei der BSB₅-Elimination blieb die CSB-Elimination nicht konstant im ganzen untersuchten Raumbelastungsbereich. Ab ca. 0,60 kg BSB₅/(m³·d) für die Lavaschlacke bzw. ca. 0,80 kg BSB₅/(m³·d) für das Kunststofffüllmaterial begann die CSB-Elimination abzusinken.

In Abbildung 7.6 sind die CSB-Werte im Zu- bzw. CSB_{mf}-Werte im Ablauf dargestellt.

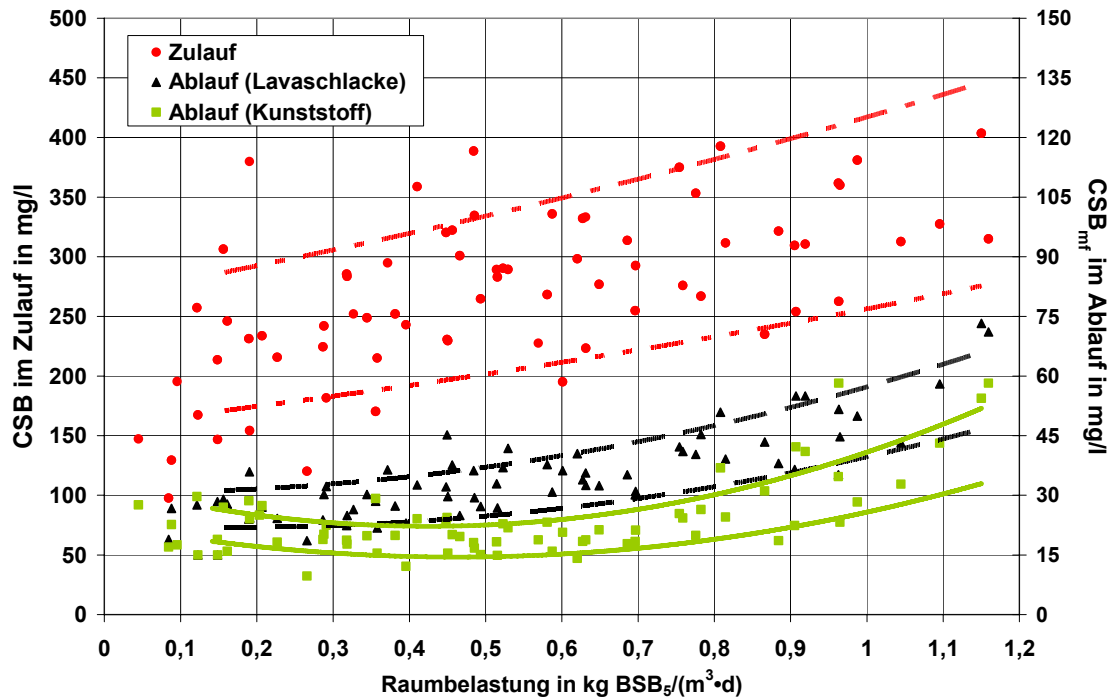


Abbildung 7.6: CSB im Zulauf und CSB_{mf} im Ablauf des halbertechnischen Tropfkörpers in Abhängigkeit von der BSB_5 -Raumbelastung

Die CSB_{mf} -Ablaufwerte des Kunststofffüllmaterials lagen während des ganzen untersuchten Raumbelastungsbereichs deutlich unten den Werten der Lavaschlacke. Ausgehend von der oberen Linie der Vertrauensbereiche ist festzustellen, dass mit der Lavaschlacke CSB_{mf} -Ablaufwerte < 30 mg/l nicht sicher eingehalten werden können. Für das Kunststofffüllmaterial wurden CSB_{mf} -Ablaufwerte < 30 mg/l bis eine BSB_5 -Raumbelastung von $0,80$ $kg/(m^3 \cdot d)$ erreicht.

Da sowohl die CSB-Zulaufwerte als auch die CSB-Raumbelastungen im Laufe der Versuche zunahm, können die Einflüsse beider Parameter auf die CSB_{mf} -Ablaufwerte nicht separat beurteilt werden.

Bei einer BSB_5 -Raumbelastung zwischen ca. $0,30 - 0,60$ $kg/(m^3 \cdot d)$ wurden für das Kunststofffüllmaterial relativ geringere CSB_{mf} -Ablaufwerte beobachtet. Dies kann auf die Zunahme der Stabilität des Verfahrens infolge der in den Phasen III und IV auftretenden hohen Tropfzeiten (siehe Abschnitt 7.6) zurückgeführt werden.

7.2.2 NH_4 -N-Elimination

Die NH_4 -N-Elimination ($(TKN_{ZU} - NH_4-N_{AB} - 2 \text{ mg/l } N_{org,AB}) / TKN_{ZU}$) wurde in Abbildung 7.7 gegen die TKN-Raumbelastung (in Anlehnung an das Arbeitsblatt 281 (ATV-DVWK, 2001)), welches sich auf die TKN-Raumbelastung für die Bemessung des Nitrifikationsvolumens bezieht, aufgetragen. Das Arbeitsblatt 135 (ATV, 1989) weist auf einen Einfluss des BSB_5/TKN -Verhältnisses auf die Nitrifikation hin, welche mit zunehmendem BSB_5/TKN -Verhältnis reduziert werden kann. Okey und Albertson (in

Metcalf und Eddy, 2003) fanden ebenfalls einen Einfluss des BSB_5/TKN -Verhältnisses auf die Nitrifikation (siehe Abschnitt 4.5). Um zu untersuchen, ob der allmähliche Anstieg des BSB_5/TKN -Verhältnisses im Laufe der Versuche (siehe Abschnitt 7.1) die NH_4 -N-Elimination beeinflusste, wurden die Punkte für $BSB_5/TKN > 3,8$ und $BSB_5/TKN < 3,8$ separat dargestellt.

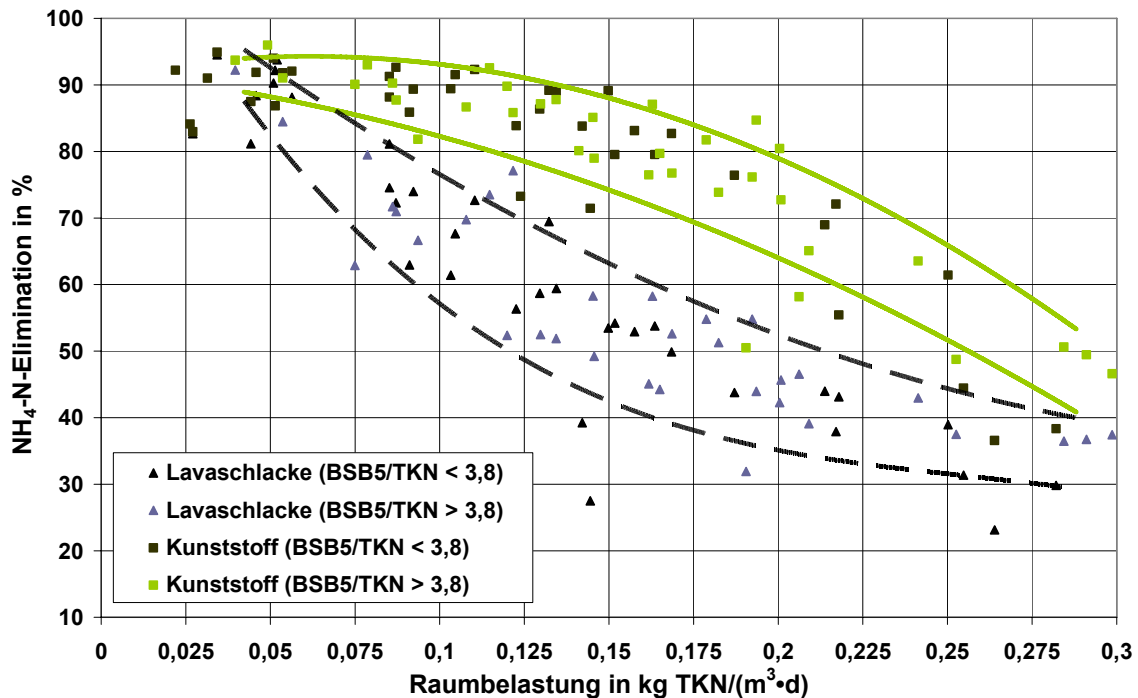


Abbildung 7.7: NH_4 -N-Elimination für den halbtechnischen Tropfkörper in Abhängigkeit von der TKN-Raumbelastung und dem BSB_5/TKN -Verhältnis

Aus der obigen Abbildung ist die bessere NH_4 -N-Elimination des Kunststoff-Tropfkörpers deutlich zu erkennen. Die Abnahme der Leistungsfähigkeit mit zunehmender Raumbelastung erfolgte bei dem Kunststofffüllmaterial langsamer als bei der Lavaschlacke. Im Bereich mittlerer Raumbelastungen zwischen ca. 0,150 – 0,200 $kg\ TKN/(m^3 \cdot d)$ ist der Unterschied zwischen den beiden Füllmaterialen am höchsten. Bei einer Raumbelastung von z.B. 0,170 $kg\ TKN/(m^3 \cdot d)$ erreichte das Kunststofffüllmaterial eine NH_4 -N-Elimination zwischen 70 und 85 %; die Lavaschlacke erreichte für dieselbe Raumbelastung eine NH_4 -N-Elimination zwischen 38 – 58 %.

Die Messpunkte für BSB_5/TKN -Verhältnisse größer und kleiner als 3,8 überlappen sich im ganzen Vertrauensbereich. Ein Einfluss des BSB_5/TKN -Verhältnisses auf die NH_4 -N-Elimination konnte nicht beobachtet werden.

Die NH_4 -N-Ablaufwerte und die TKN-Zulaufwerte sind in Abbildung 7.8 gegen die TKN-Raumbelastung aufgetragen.

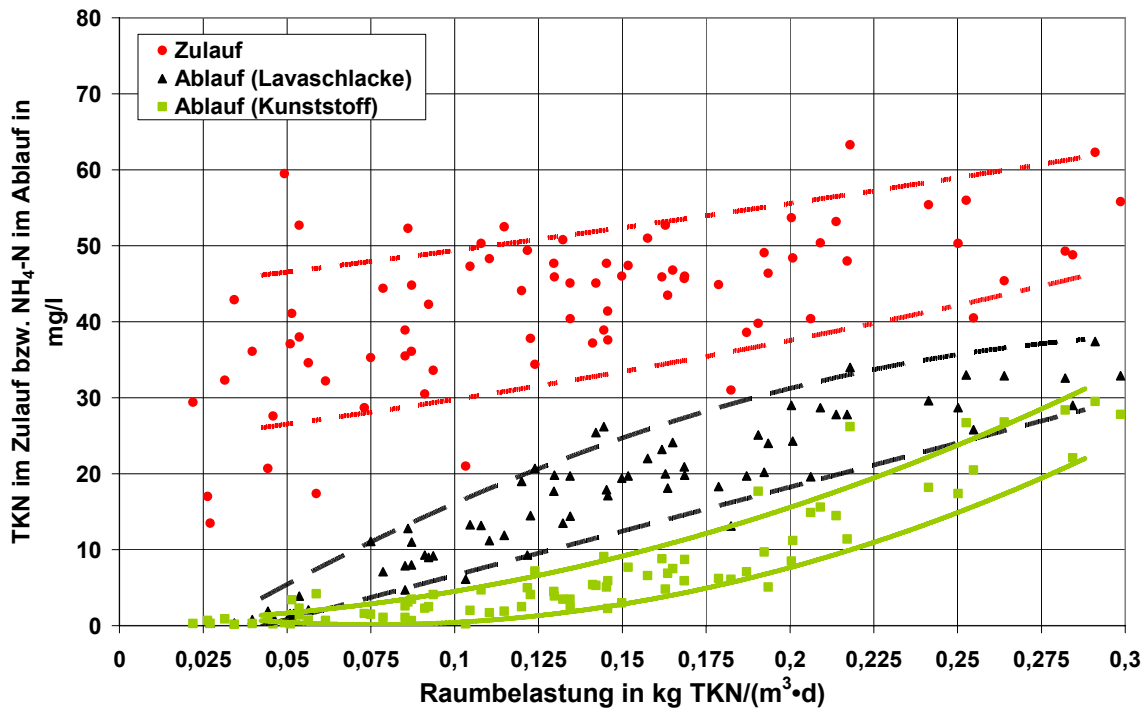


Abbildung 7.8: TKN-Konzentration im Zulauf und $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration im Ablauf des halbtechnischen Tropfkörpers in Abhängigkeit von der TKN-Raumbelastung

Die bessere $\text{NH}_4\text{-N}$ -Elimination des Kunststofffüllmaterials gegenüber der Lavaschlacke zeigt sich in der obigen Abbildung. Basierend auf den oberen Linien der Vertrauensbereiche ist zu beobachten, dass der Lavaschlacke-Tropfkörper bei einer Raumbelastung von $0,05 \text{ kg TKN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ (zulässige Raumbelastung in Anlehnung an das Arbeitsblatt 281 (ATV-DVWK, 2001), siehe auch Abschnitt 5.2) eine $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration von 5 mg/l im Ablauf sicher einhält. Für den kunststoffgefüllten Tropfkörper wird diese Konzentration bis zu einer mehr als doppelt so hoher Raumbelastung (ca. $0,110 \text{ kg TKN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$) sicher eingehalten.

Somit können bei niedrigeren Anforderungen an die Ablaufqualität bei höheren Temperaturen höhere Raumbelastungen für beide Füllmaterialien eingestellt werden. Bei einer Raumbelastung bis zu $0,075 \text{ kg TKN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ (= ca. $0,3 \text{ kg BSB}_5/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$) für die Lavaschlacke bzw. $0,15 \text{ kg TKN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ (= ca. $0,6 \text{ kg BSB}_5/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$) für das Kunststofffüllmaterial wurden beispielsweise bei $25 \text{ }^\circ\text{C}$ Abwassertemperatur noch $10 \text{ mg NH}_4\text{-N/l}$ im Ablauf sicher eingehalten.

Mit zunehmender Raumbelastung ist bei beiden Füllmaterialien trotz der noch relativ hohen $\text{NH}_4\text{-N}$ -Eliminationen ein kontinuierlicher Anstieg der Ablaufwerte zu erkennen. Da die TKN-Werte im Zulauf und die TKN-Raumbelastung im Laufe der Versuche gleichzeitig zunahm, ist eine Trennung der Effekte beider Parameter auf die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Ablaufwerte nicht möglich. Die Bandbreite der Ablaufwerte und die Instabilität des Verfahrens nehmen in der Regel mit zunehmender Raumbelastung zu.

7.2.3 Vergleich der Füllmaterialien anhand der organischen Flächenbelastung

In den letzten Abschnitten wurde gezeigt, dass das Kunststofffüllmaterial eine bessere Reinigungsleistung als die Lavaschlacke erbringt. Um zu überprüfen, ob diese bessere Leistung auf die höhere spezifische Oberfläche des Kunststofffüllmaterials zurückgeführt werden kann, wurde für die Auswertung die BSB₅-Elimination gegen die BSB₅-Flächenbelastung in Abbildung 7.9 aufgetragen. Für die spezifische Oberfläche der Lavaschlacke wurde 90 m²/m³ bzw. für das Kunststofffüllmaterial 152 m²/m³ angenommen.

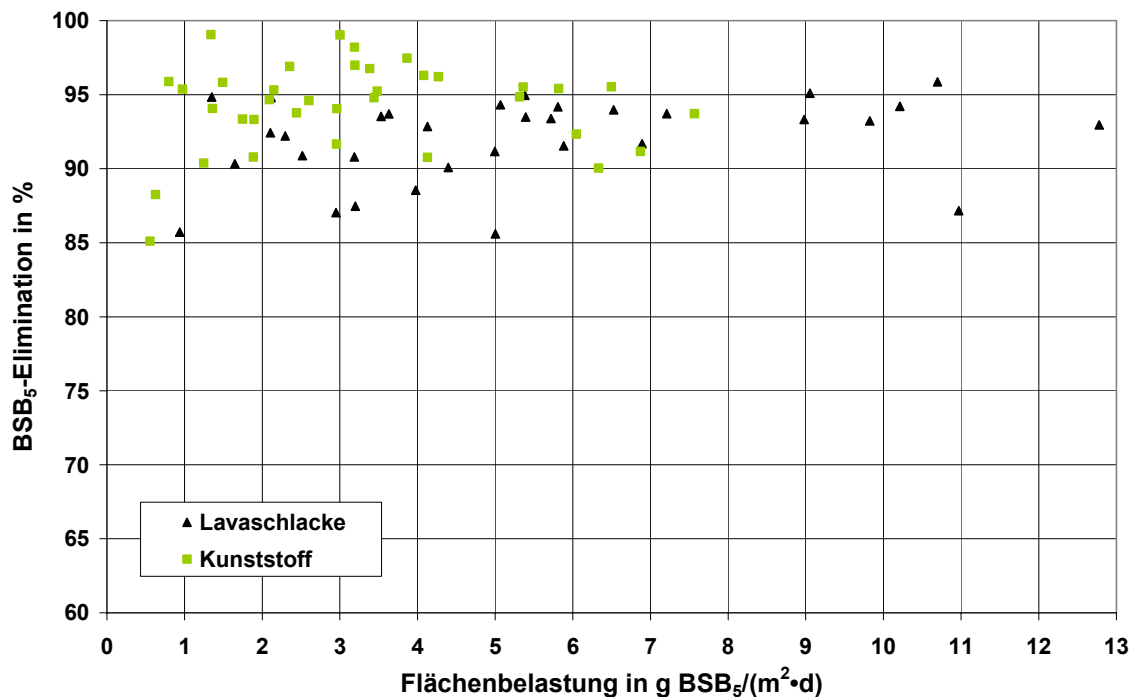


Abbildung 7.9: BSB₅-Elimination für den halbtechnischen Tropfkörper in Abhängigkeit von der BSB₅-Flächenbelastung

Das Kunststofffüllmaterial zeigte im unteren Bereich der Flächenbeschickung höhere BSB₅-Eliminationen trotz gleicher BSB₅-Flächenbelastung. Andere Eigenschaften des Kunststofffüllmaterials wie z.B. größere Poren für den Luftdurchlass und die Strömungsbedingungen spielen anscheinend ebenso eine wichtige Rolle.

Für die Auswertung der Nitrifikation wurde in Abbildung 7.10 die NH₄-N-Elimination gegen die TKN-Flächenbelastung aufgetragen.

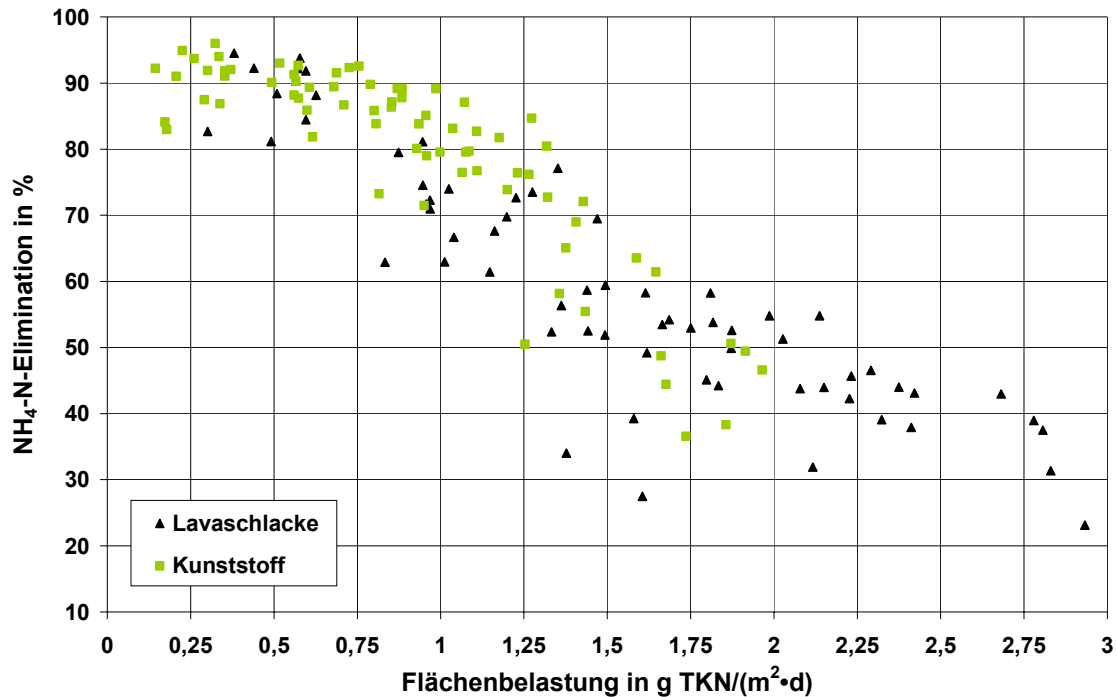


Abbildung 7.10: NH₄-N-Elimination für den halbtechnischen Tropfkörper in Abhängigkeit von der TKN-Flächenbelastung

Am Anfang des Flächenbelastungsbereichs (< ca. 0,6 g TKN/(m³·d)) stimmen die Werte beider Füllmaterialien miteinander gut überein. Dasselbe gilt am Ende des untersuchten Flächenbelastungsbereichs (> ca. 1,3 g TKN/(m³·d)). Die Daten im Mittelbereich entsprechen den Phasen III bis IV für das Kunststofffüllmaterial. In diesen Phasen wies der Kunststoff-Tropfkörper relativ hohe Tropfzeiten (siehe Abschnitt 7.6) im Vergleich zur Lavaschlacke auf. Dies könnte möglicherweise die bessere NH₄-N-Elimination des Kunststofffüllmaterials in diesem Flächenbelastungsbereich erklären.

7.2.4 N_{ges}- und P_{ges}-Elimination

Um zu überprüfen, inwieweit Stickstoff durch Inkorporierung in die Biomasse sowie durch Denitrifikationsvorgänge entfernt wurde, wurde in Abbildung 7.11 die N_{ges}-Elimination ($(N_{ges,ZU} - NH_4-N_{AB} - 2 \text{ mg/l } N_{org,AB} - NO_X-N_{AB}) / N_{ges,ZU}$) des halbtechnischen Tropfkörpers gegen die TKN-Raumbelastung aufgetragen.

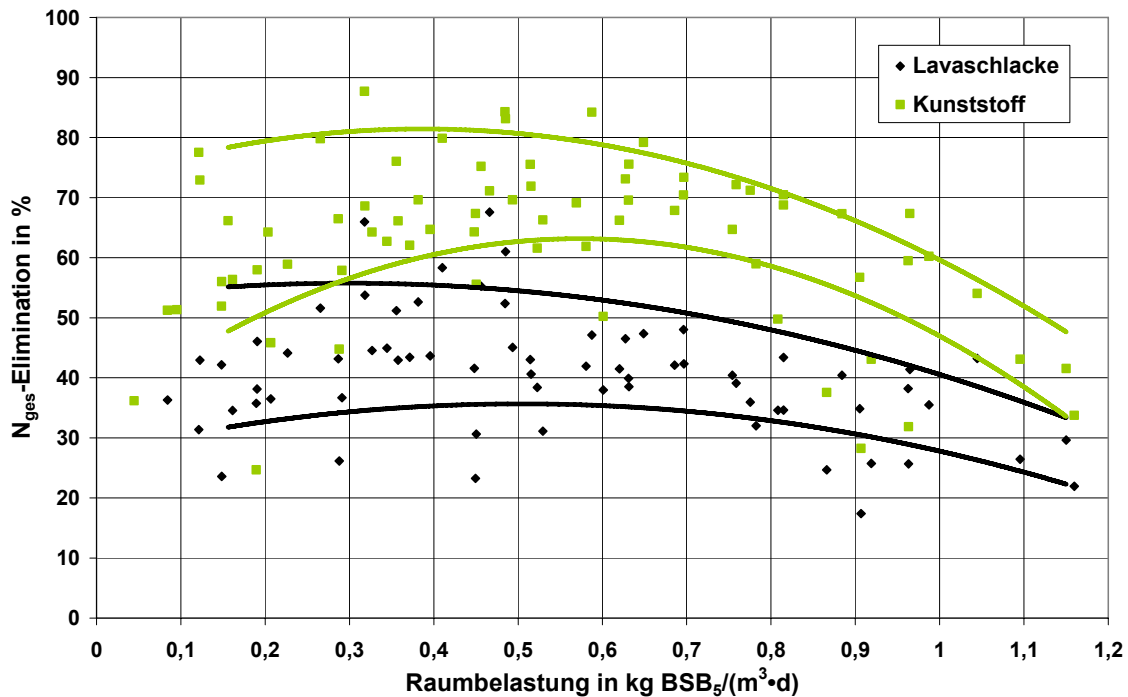


Abbildung 7.11: N_{ges} -Elimination für den halbertechnischen Tropfkörper in Abhängigkeit von der TKN-Raumbelastung

Es wurde deutlich mehr Stickstoff beim Kunststofffüllmaterial als bei der Lavaschlacke eliminiert. Die Stickstoffelimination bei beiden Füllmaterialien können nicht nur auf die Inkorporation des Stickstoffs in die Biomasse, sondern auch auf simultane Denitrifikationsvorgänge zurückgeführt werden.

Ausgehend von einem angenommenen BSB_5 von 200 mg/l und einer BSB_5 -Elimination von 90 % werden ca. 180 mg/l BSB_5 eliminiert. Für einen Einbau von Stickstoff in die Biomasse von 3 % des eliminierten BSB_5 (ATV-DVWK, 2001) werden nur ca. 5 mg/l Stickstoff inkorporiert. Bei einer N_{ges} -Konzentration im Zulauf von ca. 40 mg/l beträgt die N_{ges} -Elimination durch Inkorporation in die Biomasse demnach nur ca. 13 %. Da die N_{ges} -Eliminationen in der obigen Abbildung deutlich darüber liegen, kann gefolgert werden, dass der größte Anteil der N_{ges} -Elimination über simultane Denitrifikation erfolgt.

Es ist zu erkennen, dass die N_{ges} -Elimination in der Phase I (Raumbelastung ca. 0,15 kg $BSB_5/(m^3 \cdot d)$) im Vergleich zu den nachfolgenden Phasen relativ niedrig ist. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass die Denitrifikation in der oberen Schicht des Tropfkörpers infolge des hohen Rückführverhältnisses in der Phase I (siehe Abschnitt 7.1) und des damit verbundenen Anstiegs des gelösten Sauerstoffs insbesondere beim Kunststofffüllmaterial deutlich beeinträchtigt wurde.

Die Verbesserung der N_{ges} -Elimination im Bereich mittlerer Raumbelastung beim Kunststofffüllmaterial kann jedoch nicht nur auf die Reduzierung der Rezirkulationsraten zurückgeführt werden. Die hohen Tropfzeiten assoziiert mit einem dicken Biofilm in den

Phasen III und IV (siehe Abschnitt 7.6) scheinen zur Verbesserung der Stickstoffelimination ebenso beigetragen zu haben.

Aus den obigen Feststellungen lässt sich erkennen, dass die simultane Denitrifikation im Tropfkörper nur schwer kontrolliert werden kann. Bis ca. $0,5 \text{ kg BSB}_5/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ wurde trotzdem eine maximale N_{ges} -Elimination von ca. 55 % für die Lavaschlacke bzw. von ca. 80 % für das Kunststofffüllmaterial erreicht. Aufgrund der Instabilität der Denitrifikation können jedoch kleinere N_{ges} -Eliminationen erreicht werden.

Um zu überprüfen, inwieweit Phosphor entfernt wurde, wurde die P_{ges} -Elimination ($(P_{\text{ges,ZU}} - \text{PO}_4\text{-P}_{\text{AB}}) / P_{\text{ges,ZU}}$) in Abbildung 7.12 in Abhängigkeit von der Raumbelastung aufgetragen.

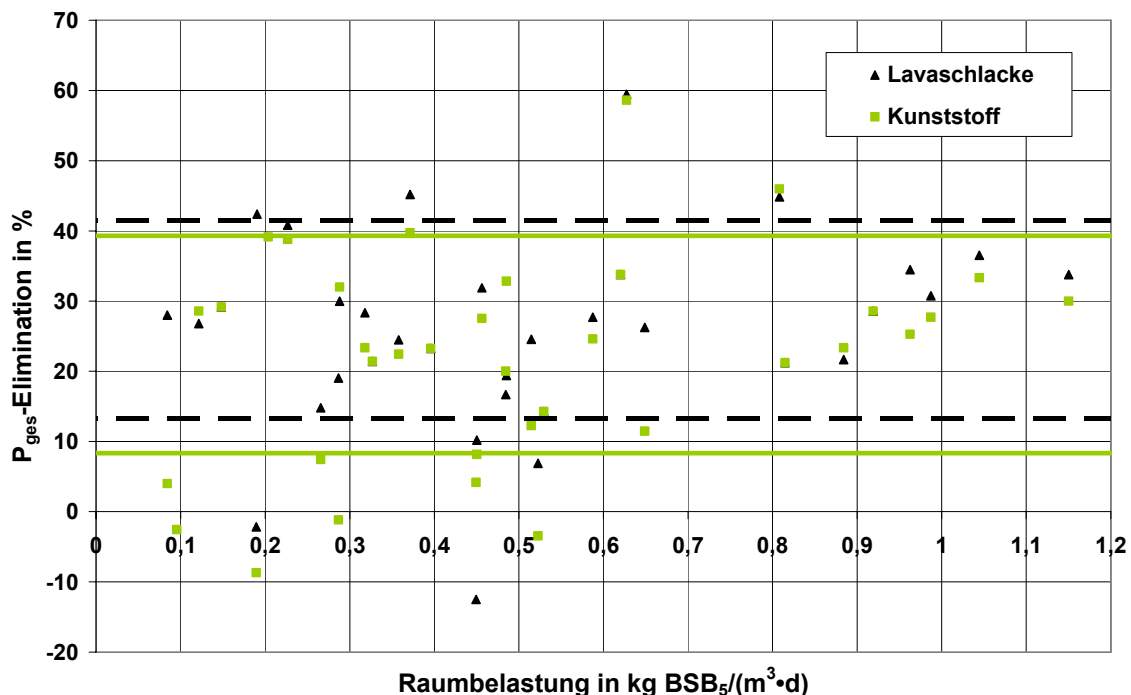


Abbildung 7.12: P_{ges} -Elimination für den halbtechnischen Tropfkörper in Abhängigkeit von der BSB_5 -Raumbelastung

Die P_{ges} -Elimination beider Füllmaterialien blieb konstant für den ganzen untersuchten Raumbelastungsbereich. Es ergab sich bei der Auswertung, dass einige Punkte negativ sind. Diese negative P_{ges} -Elimination kann nur durch Rücklösungen in anaeroben Zonen im Biofilm erklärt werden.

Der Kunststoff-Tropfkörper wies eine P_{ges} -Elimination zwischen 8 und 39 % auf, der Lavaschlacke-Tropfkörper erreichte eine P_{ges} -Elimination zwischen 13 und 42 %. Die niedrigere P_{ges} -Elimination des Kunststoff-Tropfkörpers trotz höherer BSB_5 -Elimination im Vergleich zur Lavaschlacke deutet auf stärkere Rücklösungen im Kunststoff-Tropfkörper hin.

Da sich die BSB_5 -Elimination für den ganzen Raumbelastungsbereich nicht änderte, ist es möglich das mittlere Verhältnis zwischen $P_{ges,elim} / BSB_{5,elim}$ im Laufe der Versuche zu berechnen. Für die Lavaschlacke ergab sich $0,012 P_{ges,elim} / g BSB_{5,elim}$ bzw. für das Kunststofffüllmaterial $0,010 g P_{ges,elim} / g BSB_{5,elim}$. Es wird demnach bei beiden Füllmaterialien ca. 1 % des eliminierten BSB_5 in die Biomasse eingebaut.

Aus Abbildung 7.13 können die absoluten PO_4 -P-Ablaufwerte für beide Füllmaterialien entnommen werden.

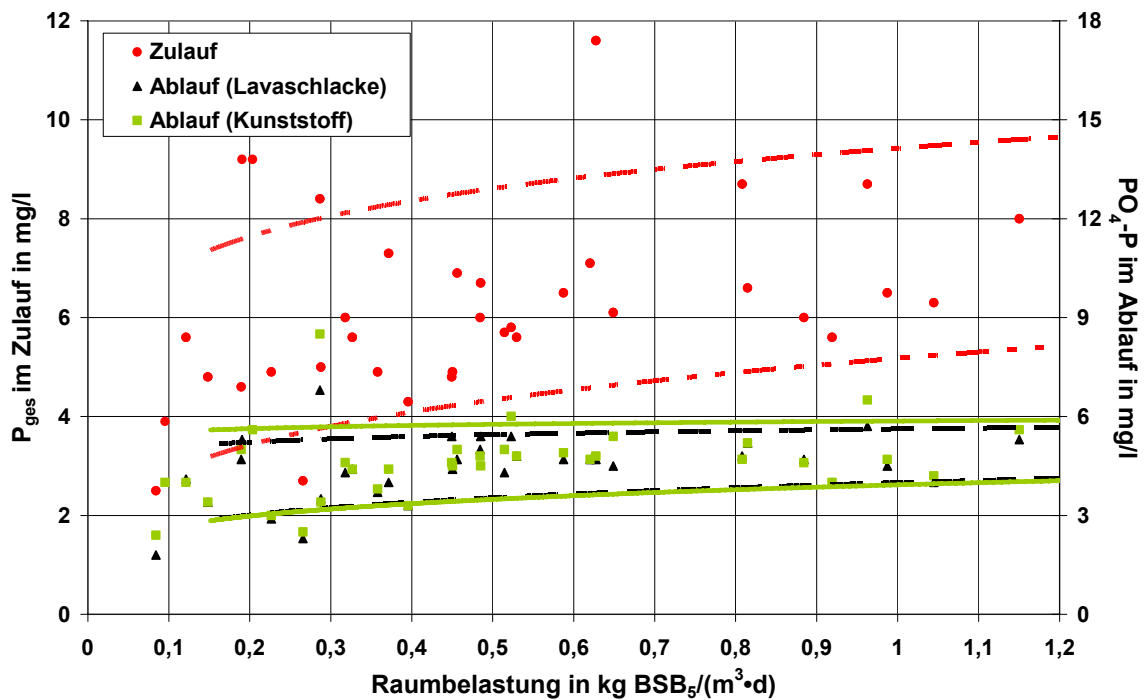


Abbildung 7.13: P_{ges} -Konzentration im Zulauf und PO_4 -P-Konzentration im Ablauf des halbtechnischen Tropfkörpers in Abhängigkeit von der BSB_5 -Raumbelastung

Die geringfügigen höheren PO_4 -P-Ablaufwerte für den Kunststoff-Tropfkörper werden auf die oben beschriebenen Rücklösungsvorgänge zurückgeführt. Der geringfügige Anstieg der Ablaufwerte mit zunehmender Raumbelastung kann durch die Erhöhung der P_{ges} -Zulaufkonzentrationen erklärt werden. Im ganzen untersuchten Raumbelastungsbereich wurden selten PO_4 -P-Ablaufwerte über 4 mg/l für beide Füllmaterialien festgestellt.

7.2.5 Vergleich der Leistungskurven mit Literaturdaten

Der folgende Abschnitt dient der Einordnung der eigenen Daten in Literaturwerte, die dem deutschen Bemessungsansatz im Arbeitsblatt 281 (ATV-DVWK, 2001) zugrunde liegen. Die Erfahrungswerte und Leistungskurven, auf denen das Arbeitsblatt 281 basiert, wurden aus Untersuchungen von Tropfkörperanlagen unter gemäßigten Abwassertemperaturen in den letzten Jahrzehnten hergeleitet. Die Gegenüberstellung der in diesem Projekt gewonnenen Daten mit Erfahrungswerten der deutschen Literatur kann wichtige Hinweise

geben, inwieweit hohe Abwassertemperaturen in verschiedenen Raumbelastungsbereichen zur Leistungssteigerung beitragen.

Da die auf das Kunststofffüllmaterial bezogenen Literaturdaten aufgrund der verschiedenen verwendeten Arten von Füllmaterialien sehr voneinander abweichen, ist dieser Vergleich nur schwer möglich und infolgedessen wird darauf in diesem Bericht verzichtet. Um die ermittelte Reinigungsleistung der Lavaschlacke mit Literaturwerten zu vergleichen, wird der gewonnene Vertrauensbereich bezüglich der BSB₅-Elimination (Abbildung 7.3) gegenüber den Daten von Imhoff (1979) (Abbildung 3.2) zusammengestellt (Abbildung 7.14). Die letzteren entsprechen Tropfkörperanlagen des Ruhrverbandes, die unter gemäßigten Temperaturen betrieben wurden. Der von Imhoff gekennzeichnete Bereich wurde aus der Auswertung von 44 Tropfkörperanlagen des Ruhrverbandes gewonnen. Imhoff wertete dafür Ablaufproben der Nachklärung nach 2 h Absetzzeit im Labor aus, so dass seine Werte mit den hier normierten BSB₅-Werten vergleichbar sind.

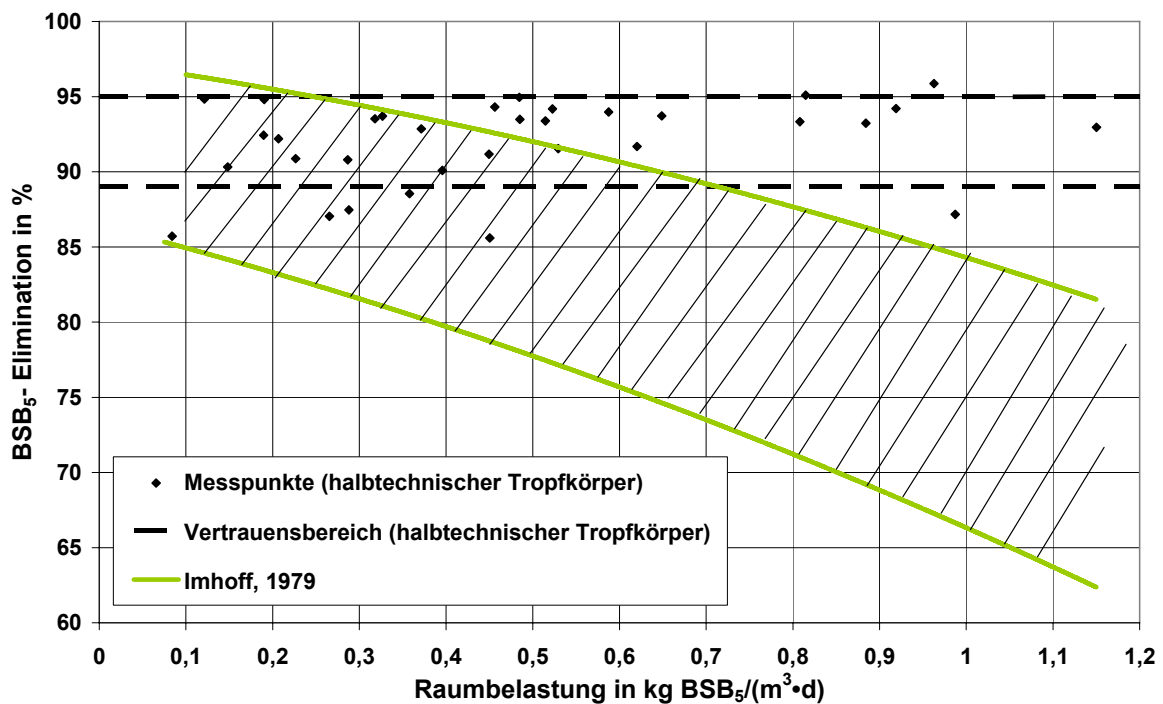


Abbildung 7.14: BSB₅-Elimination in Abhängigkeit von der BSB₅-Raumbelastung des halbtechnischen Tropfkörpers mit Lavaschlacke bei einer Abwassertemperatur von 25 °C (BSB₅-Ablaufwerte normiert auf max. 20 mg SS/l) und von brockengefüllten Tropfkörpern des Ruhrverbandes mit gemäßigten Abwassertemperaturen (zusätzliche Absetzzeit der Ablaufproben von 2 h im Labor; Imhoff, 1979)

Aus der Überlappung der Vertrauensbereiche ist festzustellen, dass im Bereich kleiner Raumbelastung (< ca. 0,30 kg BSB₅/(m³·d)) der für den halbtechnischen Tropfkörper gewonnene Vertrauensbereich innerhalb des Vertrauensbereichs von Tropfkörpern mit gemäßigten Abwassertemperaturen liegt. Erst im Bereich höherer BSB₅-Raumbelastung

ist die BSB₅-Elimination des halbtechnischen Tropfkörpers deutlich darüber. Dies ist darauf zurückzuführen, dass im Bereich niedriger Raumbelastungen die Leistungsgrenze des biologischen Abbaus sowohl vom halbtechnischen Tropfkörper als auch von den von Imhoff ausgewerteten Tropfkörpern erreicht wurde.

In Abbildung 7.15 wird derselbe Vergleich bezüglich der CSB-Elimination durchgeführt.

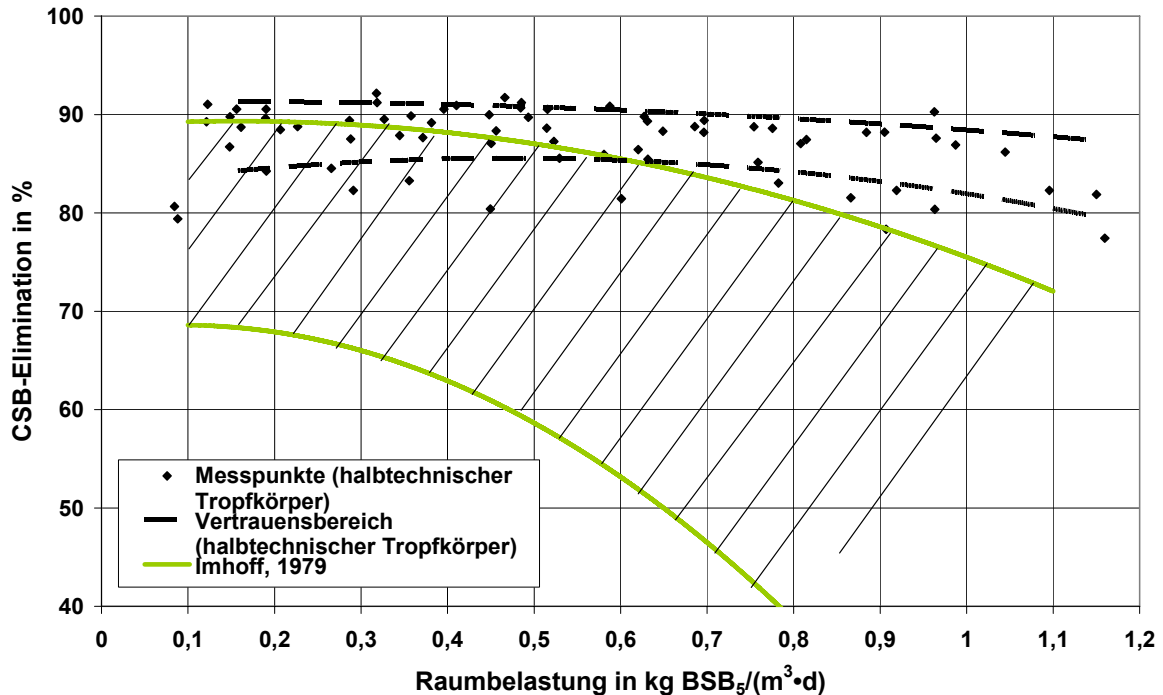


Abbildung 7.15: CSB-Elimination in Abhängigkeit von der BSB₅-Raumbelastung des halbtechnischen Tropfkörpers mit Lavaschlacke bei einer Abwassertemperatur von 25 °C (membranfiltrierte Ablaufwerte) und von brockengefüllten Tropfkörpern des Ruhrverbandes mit gemäßigten Abwassertemperaturen (zusätzliche Absetzzeit der Ablaufproben von 2 h im Labor; Imhoff, 1979)

Die obigen Feststellungen zeigen sich auch bei der CSB-Elimination. Die geringfügige bessere Leistung des Tropfkörpers bei Abwassertemperatur von 25 °C im Bereich kleiner Raumbelastung kann auf die Membranfiltration der eigenen Proben zurückgeführt werden.

Da sich bei 25 °C insbesondere im Bereich hoher Raumbelastung eine Steigerung der Leistungsfähigkeit bezüglich der BSB₅- bzw. CSB-Elimination zeigt, steht in diesem Bereich mehr Tropfkörpervolumen für die Nitrifikanten zur Verfügung. Dies dürfte theoretisch zu einer Leistungssteigerung der Nitrifikation führen.

Daten zur Einschätzung der Nitrifikation über einen großen Raumbelastungsbereich wurden von Wolf (1984) ermittelt (Abbildung 3.4). Für diesen Zweck zog er den Nitratanteil ($\text{NO}_x\text{-N} / (\text{NO}_x\text{-N} + \text{NH}_4\text{-N})$) im Ablauf des Tropfkörpers als Leitparameter für die Nitrifikation heran. Dadurch ergibt sich das Problem, dass die Reduzierung des $\text{NO}_x\text{-N}$

durch Denitrifikation nicht berücksichtigt wird. Um zu überprüfen, ob die N_{ges} -Elimination bei dem halbertechnischen Tropfkörper und bei Tropfkörpern mit gemäßigten Abwassertemperaturen sich bezüglich der Denitrifikationsvorgänge deutlich unterscheidet, wurde in Abbildung 7.16 die N_{ges} -Elimination des Lavaschlacke-Tropfkörpers (Abbildung 7.11) überlappend mit den von Rincke (1967) gewonnenen Werten (Abbildung 3.5) aufgezeichnet.

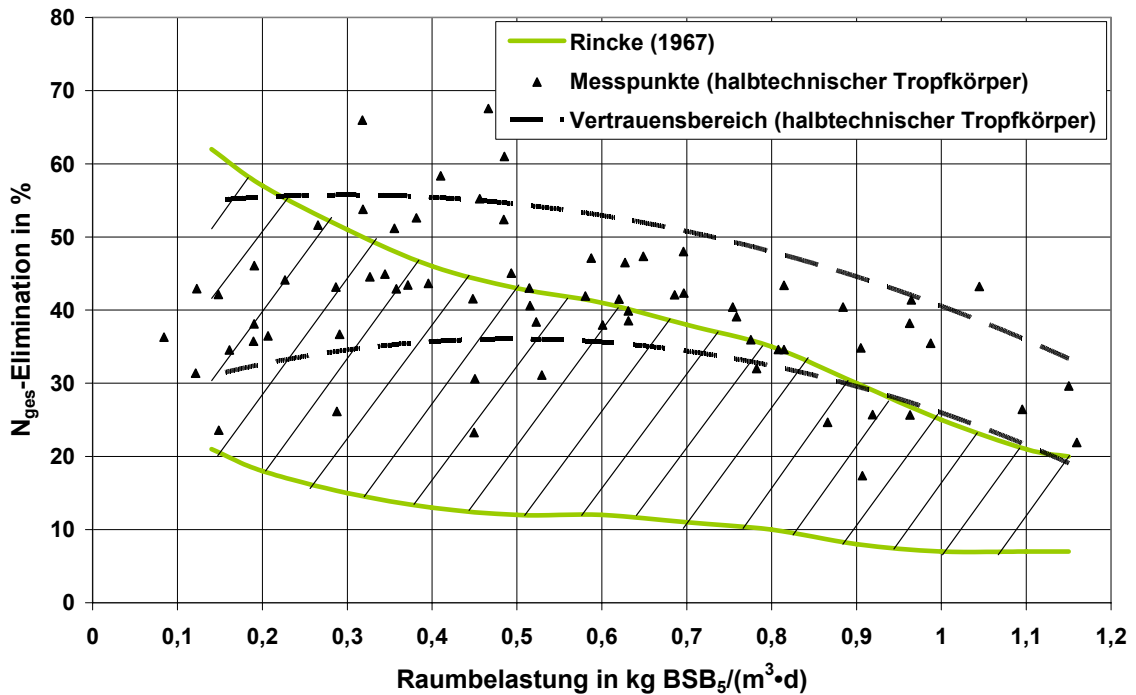


Abbildung 7.16: N_{ges} -Elimination in Abhängigkeit von der BSB_5 -Raumbelastung des halbertechnischen Tropfkörpers mit Lavaschlacke bei einer Abwassertemperatur von 25 °C und von brockengefüllten Tropfkörpern des Ruhrverbandes mit gemäßigten Abwassertemperaturen (Rincke, 1967)

Im Vergleich zu den Daten von Rincke denitrifizierte der Tropfkörper bei 25 °C ab einer Raumbelastung von ca. 0,30 kg $BSB_5/(m^3 \cdot d)$ deutlich besser. Aus diesem Grund ist der unmittelbare Vergleich der Nitratanteile mit Wolfs Daten nur bedingt möglich. Um dies zu umgehen, wurden zu den realen NO_x -N-Ablaufwerten die durch Denitrifikation eliminierten Stickstoffmengen addiert. Hierbei wurde angenommen, dass 1,5 % der CSB-Fracht im Zulauf als Stickstoff in die Biomasse inkorporiert wird und sich 2 mg/l N_{org} im Ablauf befinden ($NO_x-N_{\text{theoretisch}} = NO_x-N_{\text{real}} + NO_x-N_{\text{denitrifiziert}} = N_{\text{ges,zu}} - \text{Inkorporation} - NH_4-N_{\text{AB}} - 2 \text{ mg } N_{\text{org,AB/l}}$).

In Abbildung 7.17 werden die Nitratanteile für Tropfkörperanlagen mit gemäßigten Temperaturen (Wolf, 1984), die rechnerisch ermittelten Nitratanteile mit der Berücksichtigung des denitrifizierten Stickstoffs für den halbertechnischen Tropfkörper und die realen Nitratanteile für den halbertechnischen Tropfkörper miteinander verglichen.

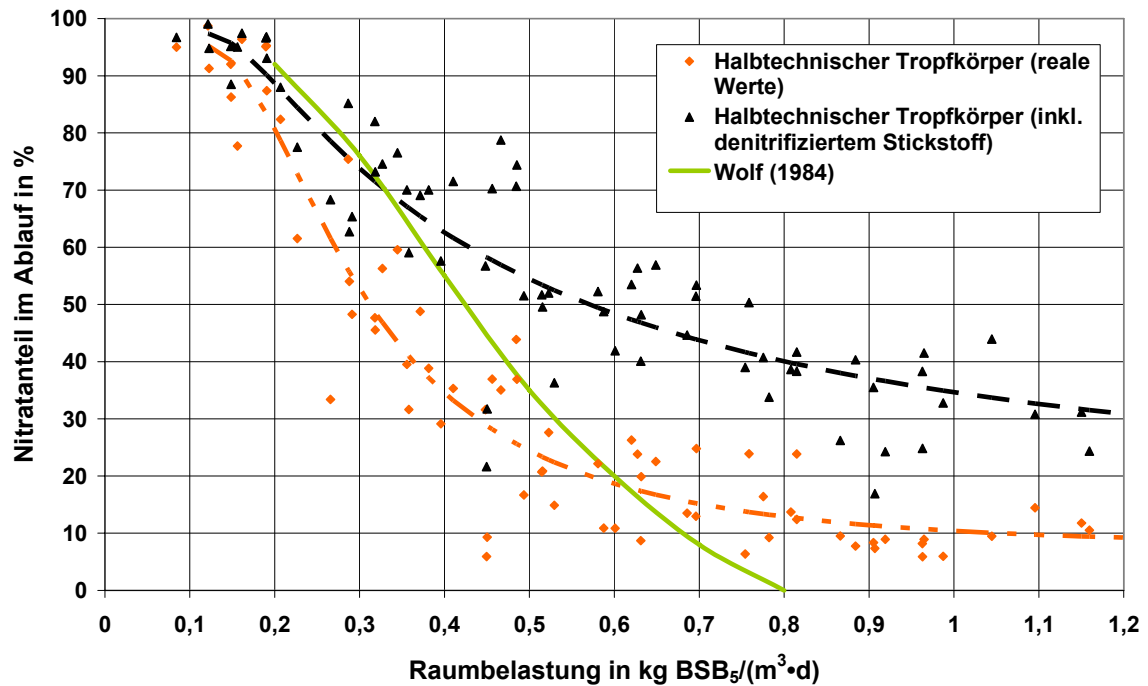


Abbildung 7.17: Theoretische und gemessene Nitratanteile ($\text{NO}_x\text{-N} / (\text{NO}_x\text{-N} + \text{NH}_4\text{-N})$) im Ablauf des halbtechnischen Tropfkörpers mit Lavaschlacke bei einer Abwassertemperatur von $25\text{ }^\circ\text{C}$ und von brockengefüllten Tropfkörpern mit gemäßigten Abwassertemperaturen (Wolf, 1984)

Es ist zu sehen, dass die Kurve mit den realen Nitratanteilen (ohne Berücksichtigung des denitrifizierten Stickstoffs) bei $25\text{ }^\circ\text{C}$ im großen Teil des betrachteten Raumbelastungsbereichs unterhalb der Kurve von Wolf liegt. Die Kurve mit Berücksichtigung des denitrifizierten Stickstoffs liegt aber im großen Bereich oberhalb der Kurve von Wolf. Aus der Betrachtung dieser Kurven können die nachfolgenden Schlüsse gezogen werden:

- Im Bereich kleiner Raumbelastung ($< \text{ca. } 0,3 \text{ kg BSB}_5/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$) liegen die Kurve von Wolf und die theoretische Kurve der halbtechnischen Tropfkörper nah beieinander; für höhere Raumbelastungen ist der theoretische Nitratanteil im Ablauf höher als derjenige nach Wolf;
- Im Bereich hoher Raumbelastung ($> \text{ca. } 0,8 \text{ kg BSB}_5/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$) wird nach Wolfs Kurve gar nicht oder kaum nitrifiziert. Im Vergleich zu den beiden anderen dargestellten Kurven mit $25\text{ }^\circ\text{C}$ Abwassertemperatur findet immer noch eine Teilnitrifikation statt;
- Der Nitratanteil im Ablauf ist infolge der Denitrifikation kein geeigneter Leitparameter für die Nitrifikationsleistung.

7.2.6 Zusammenstellung der Daten

In Abbildung 7.18 wurde die BSB_5 -Elimination und die NH_4 -N-Elimination für den halbtechnischen Tropfkörper mit Lavaschlacke gegen die Raumbelastung aufgetragen. Auf der X-Achse sind die BSB_5 -Raumbelastungen bzw. TKN-Raumbelastungen multipliziert mit 4 (Annahme $BSB_5/TKN = 4$) dargestellt. Auf der linken Y-Achse ist der eliminierte BSB_5 , auf der rechten Y-Achse ist der eliminierte NH_4 -N dargestellt. Dazu wurden die Kurven von Imhoff (1979) (siehe Abbildung 3.2), und Wolf (1984) (siehe Abbildung 3.4), nach der Umwandlung in den entsprechenden Einheiten aufgetragen.

Die aufgezeichneten Vertrauensbereiche wurden auf die oben dargestellte Eliminationen bezogen. Die Perzentilwerte des Nitratanteils im Ablauf nach Wolf wurden vereinfacht als NH_4 -N-Eliminationen angenommen. Obwohl dies streng genommen nicht richtig ist, kann die Zusammenstellung der Daten einen guten Überblick über die Leistungsfähigkeit des Tropfkörpers bei verschiedenen Raumbelastungen geben.

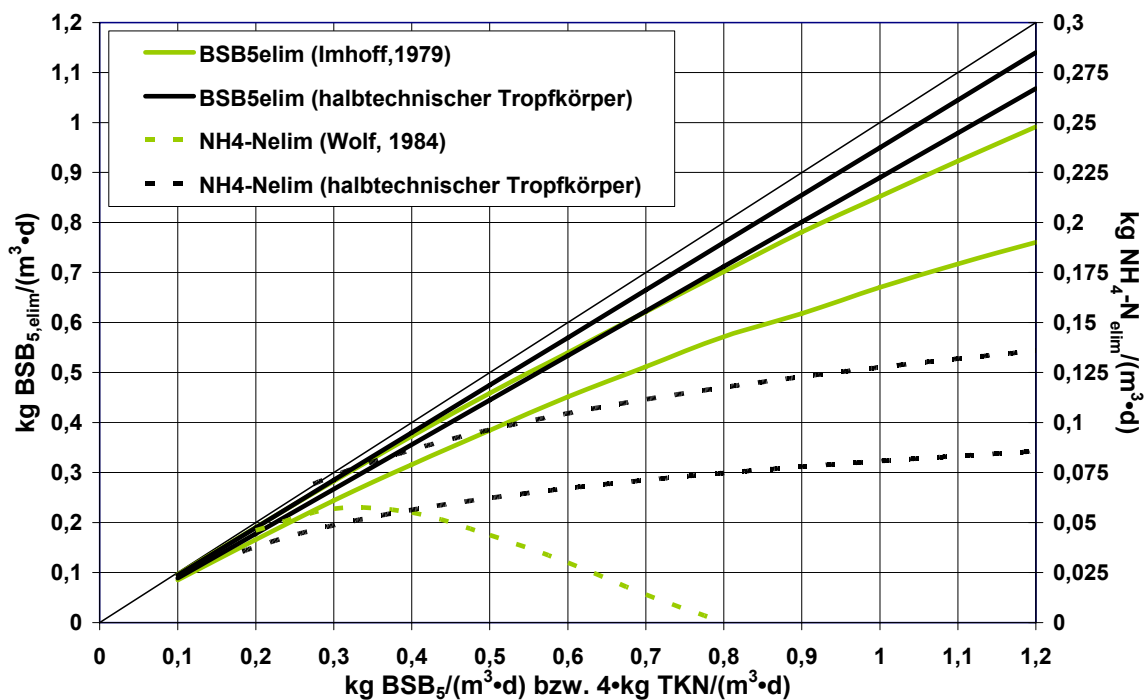


Abbildung 7.18: $BSB_{5,elim}$ -Vertrauensbereich für den halbtechnischen Tropfkörper mit Lavaschlacke bei einer Abwassertemperatur von 25 °C und für brockengefüllte Tropfkörper mit gemäßigten Abwassertemperaturen (Imhoff, 1979) in Abhängigkeit von der Raumbelastung; NH_4 - N_{elim} -Vertrauensbereich für den halbtechnischen Tropfkörper mit Lavaschlacke bei einer Abwassertemperatur von 25 °C und NH_4 - N_{elim} -Regression für brockengefüllte Tropfkörper mit gemäßigten Abwassertemperaturen (Wolf, 1984) in Abhängigkeit von der Raumbelastung

Dieselbe graphische Darstellung wurde in Abbildung 7.19 für die CSB_{elim} -Werte erstellt.

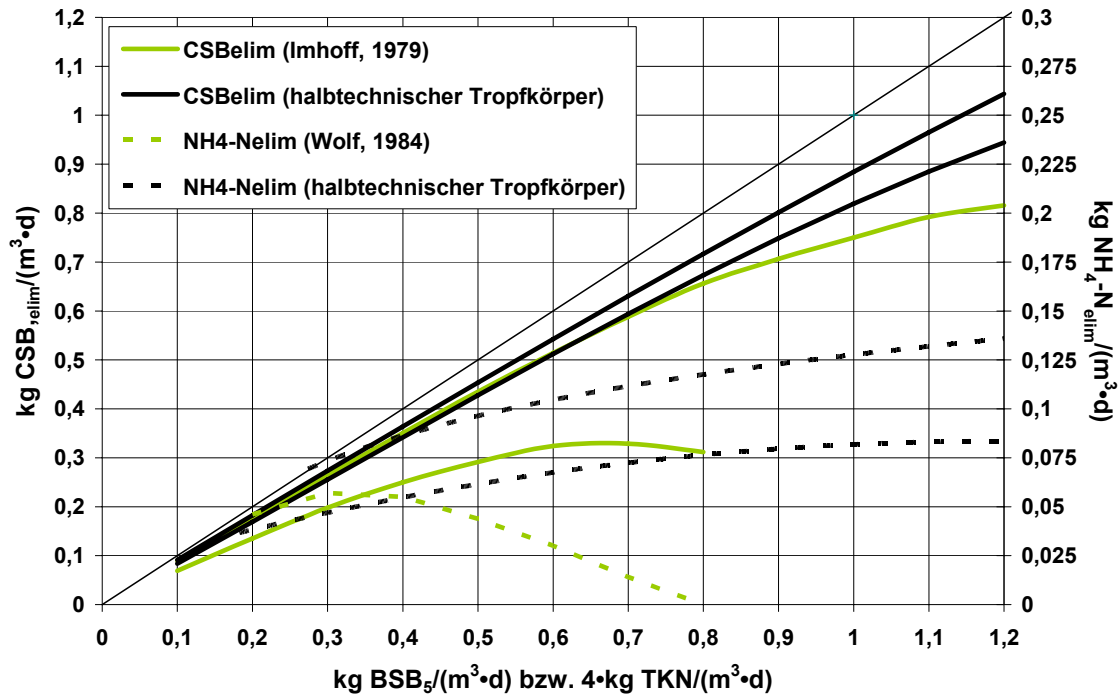


Abbildung 7.19: $CSB_{5,elim}$ -Vertrauensbereich für den halbtechnischen Tropfkörper mit Lavaschlacke bei einer Abwassertemperatur von 25 °C und für brockengefüllte Tropfkörper mit gemäßigten Abwassertemperaturen (Imhoff, 1979) in Abhängigkeit von der Raumbelastung; NH_4-N_{elim} -Vertrauensbereich für den halbtechnischen Tropfkörper mit Lavaschlacke bei einer Abwassertemperatur von 25 °C und NH_4-N_{elim} -Regression für brockengefüllte Tropfkörper mit gemäßigten Abwassertemperaturen (Wolf, 1984) in Abhängigkeit von der Raumbelastung;

Die Abbildung 7.18 und Abbildung 7.19 zeigen, dass eine Auswirkung der hohen Temperatur auf die Reinigungsleistung erst ab einer mittleren Raumbelastung zu erkennen ist. Im Bereich kleiner Raumbelastung ($< ca. 0,3 \text{ kg BSB}_5/(m^3 \cdot d)$) überlappen sich fast alle Kurven, da Kohlenstoff weitgehend eliminiert wird und eine Steigerung der Elimination nicht möglich ist. Dies kann auch in der Literatur bestätigt werden. Gebert (2001) fand z.B. nur bei dünnem Biofilm einen geringfügigen Einfluss der Abwassertemperatur auf die Reinigungsleistungen von kunststoffgefüllten Tropfkörpern. Außerdem hat er festgestellt, dass andere Betriebsaspekte (z.B. Wasserverteilung, Rezirkulation, Flächenbeschickung und der Einfluss der Interaktion zwischen Luft- und Abwassertemperaturen auf die Biofilmdicke) einen höheren Einfluss auf die Reinigungsleistung bedeutsam sind (siehe Abschnitt 3.2).

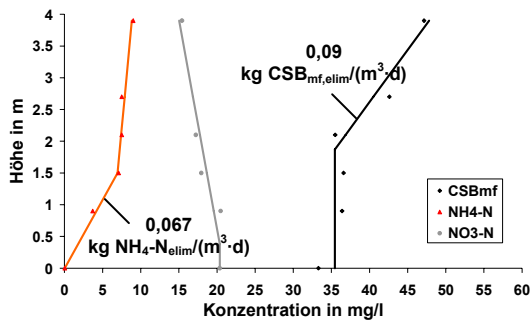
Andererseits fällt der Einfluss einer hohen Abwassertemperatur mit zunehmender Raumbelastung mehr ins Gewicht. Die Differenz zwischen der Reinigungsleistung bei 25 °C Abwassertemperatur und bei gemäßigten Temperaturen nimmt mit zunehmender Raumbelastung zu. Am Ende des untersuchten Raumbelastungsbereichs ist deutlich zu sehen, dass die BSB_5 - bzw. die CSB-Elimination noch stabil auf hohem Niveau erfolgt sowie noch eine Teilnitrifikation weitergeht.

Wolf (1984) führte der Abfall seiner Kurve ab ca. $0,4 \text{ kg BSB}_5/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ auf eine Hemmung der Nitrifikation zurück. Diese Hemmung trat bei $25 \text{ }^\circ\text{C}$ in dem untersuchten Raumbelastungsbereich nicht auf.

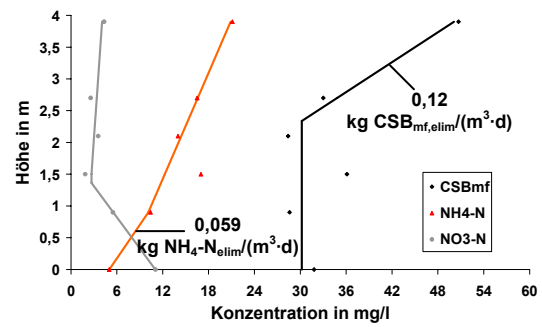
7.3 Reinigungsleistung im vertikalen Profil des Tropfkörpers

Wie im Abschnitt 5.4.2 beschrieben, wurden etwa drei Profilmessungen in jeder Phase realisiert. Die gewonnenen Punkte wurden mittels linearer Regression interpoliert. Wie bei der Auswertung der Referenzphase wurden starke Ausreißer aufgrund lokaler Versäuerungsvorgänge bei den Regressionen nicht berücksichtigt. Aufgrund von Setzungsvorgängen der Lavaschlacke verbogen sich mit der Zeit die innerhalb des Tropfkörpers installierten Beprobungskanäle. Da in der Phase VI drei von den vier Probenahmestellen ausfielen, wurden keine Profilmessungen für den Lavaschlacke-Tropfkörper in dieser Phase durchgeführt.

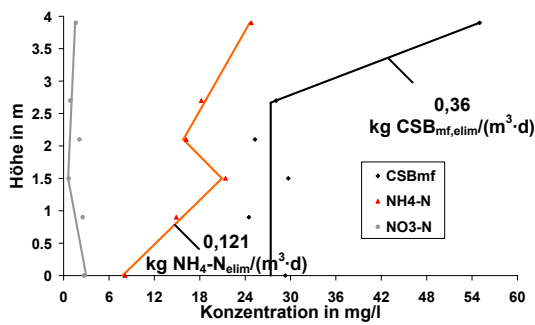
In Abbildung 7.20 sind repräsentative Profilmessungen für die Lavaschlacke (Phasen I bis IV) dargestellt. Dabei wurden die durchschnittlichen erreichten BSB_5 -Raumbelastungen (als „Mittel“ bezeichnet) in den jeweiligen Phasen bzw. die während der Messung laufenden BSB_5 -Raumbelastungen (als „momentan“ bezeichnet) in $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ angegeben. Die momentanen BSB_5 -Raumbelastungen wurden anhand von der CSB_{mf} -Werte am Drehsprenger ermittelt (d.h. die zusätzliche Belastung infolge der Rezirkulation wurde einbezogen). Das Verhältnis $\text{BSB}_5/\text{CSB}_{\text{mf}}$ wurde mit 1,6 (Mittelwert während der Versuche) angesetzt. Da die $\text{NO}_2\text{-N}$ -Werte bei allen Messungen selten 1 mg/l überschritten und wenig aussagekräftig waren, wurde auf ihre Darstellung verzichtet.



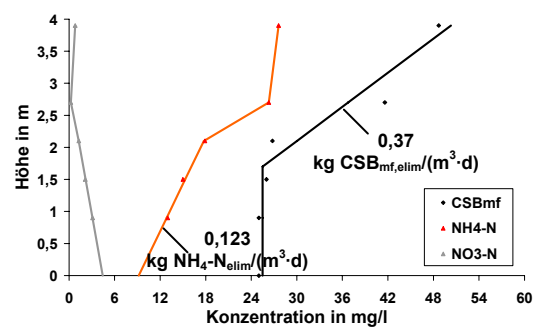
Phase I
 $B_{R,BSB} = 0,15$ (Mittel) bzw. $0,28$ (momentan)



Phase II
 $B_{R,BSB} = 0,24$ (Mittel) bzw. $0,20$ (momentan)



Phase III
 $B_{R,BSB} = 0,45$ (Mittel) bzw. $0,36$ (momentan)



Phase IV
 $B_{R,BSB} = 0,62$ (Mittel) bzw. $0,60$ (momentan)

Abbildung 7.20: Repräsentative Abbauvorgänge im vertikalen Profil des halbtechnischen Tropfkörpers mit Lavaschlacke bei einer Abwassertemperatur von 25 °C für die Phasen I bis IV (die angegebenen Raumbelastungen beziehen sich auf die durchschnittlichen erreichten Werte in den jeweiligen Phasen („Mittel“) bzw. die während der Messung laufenden BSB₅-Raumbelastungen („momentan“))

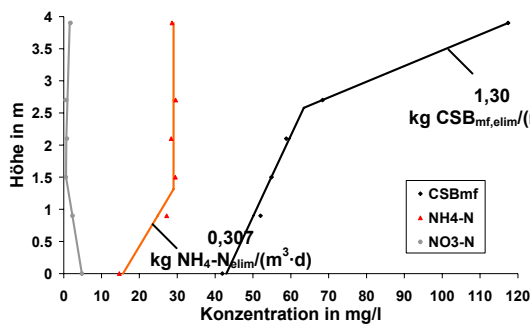
Aus den obigen Abbildungen ist festzustellen, dass der Kohlenstoffabbau komplett in der obersten Hälfte des Tropfkörpers erfolgte. Hierbei kann man von einem annähernden linearen Abbau ausgehen. Die Bestimmung der genauen Höhen, bei welchen der Kohlenstoffabbau aufhörte, war wegen der relativen großen Abstände zwischen den Messstellen nicht möglich zu bestimmen.

In Bezug auf die NH₄-N-Abnahme konnte beobachtet werden, dass die höchste Nitrifikationsgeschwindigkeit (steilste Neigung des NH₄-N-Verlaufs) erst nach einem weitgehend vollzogenen Kohlenstoffabbau auftrat. Jedoch konnte bei machen Messungen festgestellt werden, dass eine nicht zu vernachlässige NH₄-N-Abnahme bereits in der oberen Schicht stattfand (z.B. Phase II und III).

Es ist zusätzlich insbesondere aus den Abbildungen der Phasen II und III zu erkennen, dass trotz abnehmender NH₄-N-Konzentrationen in der obersten Tropfkörperhälfte keine Erhöhung der NO₃-N-Konzentrationen zu verzeichnen war. Es war im Gegenteil sogar eine Abnahme des NO₃-N zu beobachten. Da die durch Nitrifikation entstanden relativ hohen NO₃-N-Mengen nicht allein durch Inkorporation in die Biomasse hätten entfernt

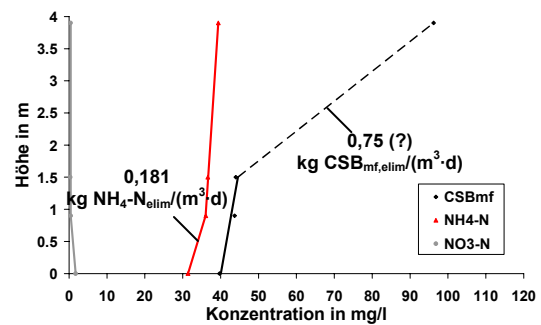
werden können, wird deutlich, dass in der oberen Schicht des Tropfkörpers Denitrifikationsprozesse stattfinden. Eine Ausnahme bildet wieder Phase I, bei der wie schon erwähnt (siehe Abschnitt 7.2.4) durch das sehr hohe Rückführverhältnis die Sauerstoffkonzentration im oberen Bereich sehr hoch war und somit wenig Denitrifikation erfolgen konnte.

In Abbildung 7.21 sind zwei weitere Profilmessungen (von Phase IV und V) dargestellt. Dabei wurde der Lavaschlacke-Tropfkörper unter relativ hoher Raumbelastung beprobt. Die Probenahmestellen auf 2,1 und 2,7 m Höhen hatten ab der Phase V einen irreparablen Defekt. Aus diesem Grund sind keine Messpunkte in der obersten Tropfkörperhälfte in der Phase V dargestellt. Aufgrund des Ausfalls der Probenahmestelle auf 1,5 m Höhe wurde keine Messung in der Phase VI realisiert.



Phase IV

$B_{R,BSB} = 0,62$ (Mittel) bzw. 1,53 (momentan)



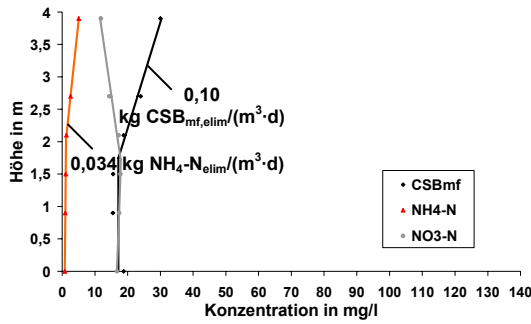
Phase V

$B_{R,BSB} = 0,77$ (Mittel) bzw. 1,37 (momentan)

Abbildung 7.21: Repräsentative Abbauvorgänge im vertikalen Profil des halbtechnischen Tropfkörpers mit Lavaschlacke bei einer Abwassertemperatur von 25 °C bei hohen Raumbelastungen für die Phasen IV und V (die angegebenen Raumbelastungen beziehen sich auf die durchschnittlichen erreichten Werte in den jeweiligen Phasen („Mittel“) bzw. die während der Messung laufenden BSB₅-Raumbelastungen („momentan“))

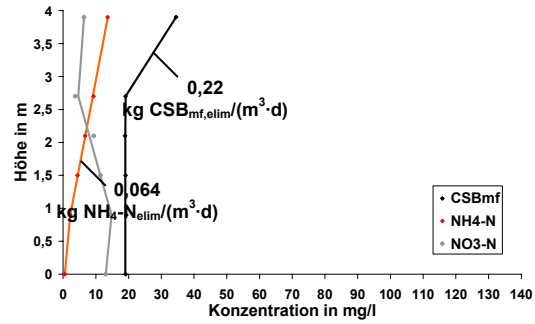
Bei hoher Raumbelastung ist festzustellen, dass die maximalen Umsatzraten im Vergleich zu den in Abbildung 7.20 dargestellten Raten erheblich erhöht wurden. Jedoch erfolgte der Kohlenstoffabbau nicht mit konstanter Geschwindigkeit während der ganzen Fließstrecke, sondern die Umsatzraten reduzierten sich ab einer bestimmten Höhe und blieben konstant bis zum Tropfkörperablauf. Erst nach der Reduzierung der CSB_{mf}-Umsatzraten trat die Nitrifikation ein.

In Abbildung 7.22 sind repräsentativen Profilmessungen für das Kunststofffüllmaterial in den Phasen I bis VI dargestellt.



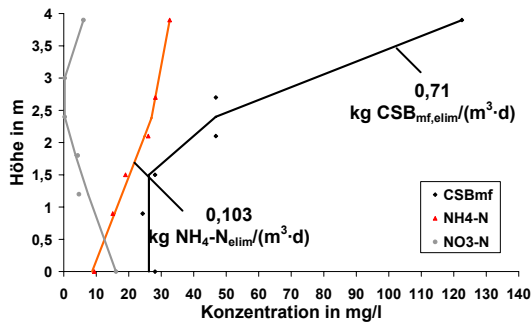
Phase I

$B_{R,BSB} = 0,15$ (Mittel) bzw. 0,20 (momentan)



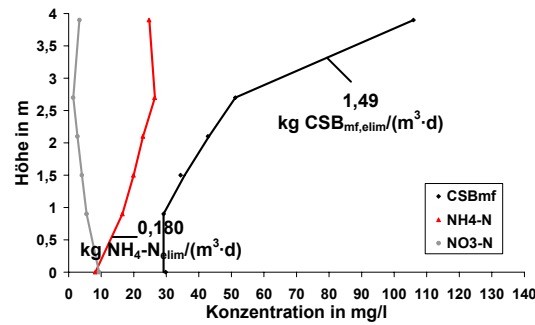
Phase II

$B_{R,BSB} = 0,24$ (Mittel) bzw. 0,24 (momentan)



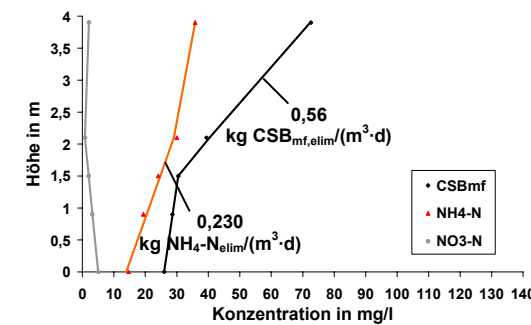
Phase III

$B_{R,BSB} = 0,45$ (Mittel) bzw. 0,74 (momentan)



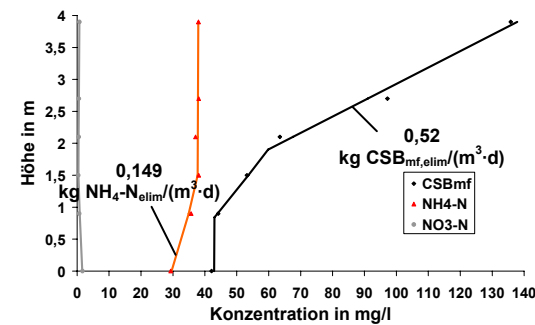
Phase IV

$B_{R,BSB} = 0,62$ (Mittel) bzw. 1,42 (momentan)



Phase V

$B_{R,BSB} = 0,77$ (Mittel) bzw. 0,94 (momentan)



Phase VI

$B_{R,BSB} = 0,98$ (Mittel) bzw. 1,42 (momentan)

Abbildung 7.22: Repräsentative Abbauvorgänge im vertikalen Profil des halbtechnischen Tropfkörpers mit Kunststofffüllmaterial bei einer Abwassertemperatur von 25 °C bei hohen Raumbelastungen für die Phasen I bis VI (die angegebenen Raumbelastungen beziehen sich auf die durchschnittlichen erreichten Werte in den jeweiligen Phase („Mittel“) bzw. die während der Messung laufenden BSB_5 -Raumbelastungen („momentan“))

Die CSB_{mf} -Elimination erfolgte wie beim Lavaschlacke-Tropfkörper in der ersten Tropfkörperhälfte für niedrige bis mittlere Raumbelastungen (z.B. Phase I bis III). Bei niedrigen Raumbelastungen (z.B. Phasen I und II) erfolgte dies annähernd linear bis keine Elimination mehr zu beobachten war. Mit der Zunahme der Raumbelastung reduzierten sich wie beim Lavaschlacke-Tropfkörper die Umsatzraten ab einer bestimmten Höhe (z.B.

Phasen III bis VI). Bei höheren Raumbelastungen wurde beobachtet, dass bei machen Messungen (z.B. Phase V) der Kohlenstoffabbau bis zum Ablauf des Tropfkörpers nicht komplett vollzogen war.

Wie beim Lavaschlacke-Tropfkörper konnte festgestellt werden, dass in der Regel die höchste Nitrifikationsgeschwindigkeit (steilste Neigung des $\text{NH}_4\text{-N}$ -Abbaus) erst nach einem weitgehenden Kohlenstoffabbau eintrat. Allerdings war in den Phasen I und II oft zu beobachten, dass bei manchen Messungen die höchste Nitrifikationsgeschwindigkeit bereits im oberen Bereich eintrat. Mit zunehmender Raumbelastung verschob sich die Nitrifikation in den unteren Tropfkörperbereich.

Denitrifikation in der obersten Tropfkörperhälfte konnte insbesondere zwischen den Phasen II und V beobachtet werden. In den Phasen I und II konnte außerdem festgestellt werden, dass Stickstoff auch im unteren Bereich des Tropfkörpers eliminiert wurde.

Um den Einfluss der Raumbelastung am Drehsprenger auf die Umsatzraten zu untersuchen, sind in Abbildung 7.23 bzw. Abbildung 7.24 die in der obersten Schicht befundenen CSB_{mf} -Umsatzraten gegen die momentane BSB_5 -Raumbelastung für alle durchgeführte Profilmessungen am Lavaschlacke- bzw. Kunststoff-Tropfkörper aufgetragen. Aufgrund des oben beschriebenen Ausfalls der Messungen bei der Lavaschlacke sind weniger Punkte in Abbildung 7.24 als in Abbildung 7.25 zu finden.

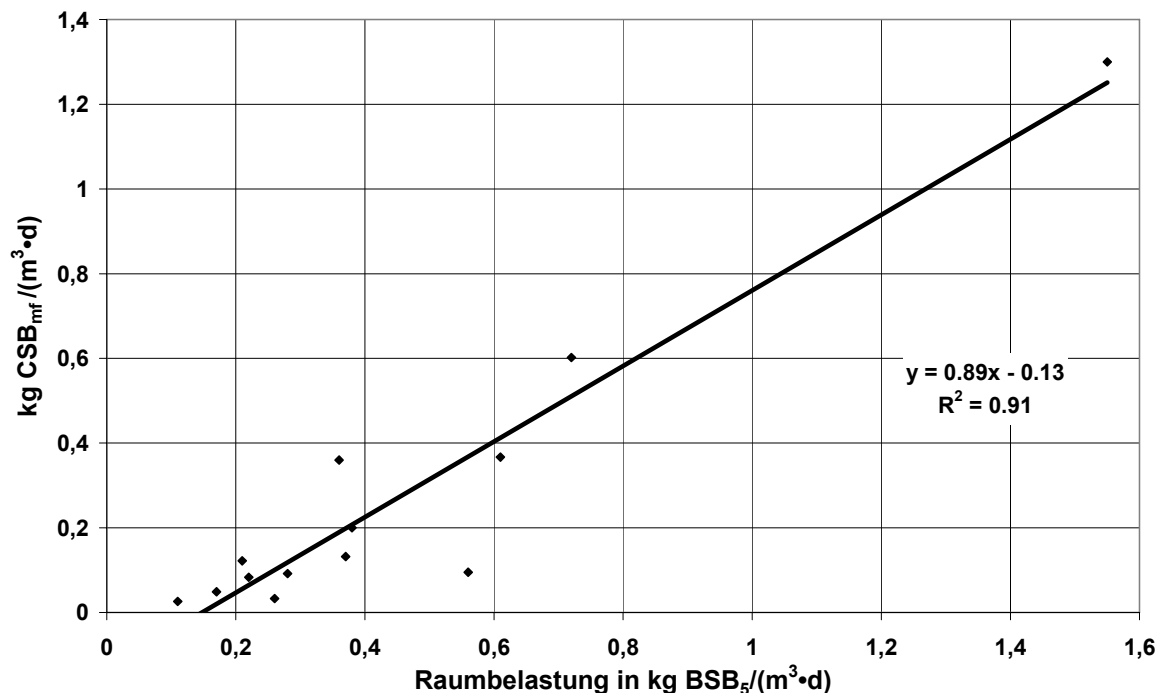


Abbildung 7.23: Einfluss der BSB_5 -Raumbelastung auf die Umsatzraten in der oberen Schicht des halbertechnischen Tropfkörpers bei einer Abwassertemperatur von 25 °C mit Lavaschlacke

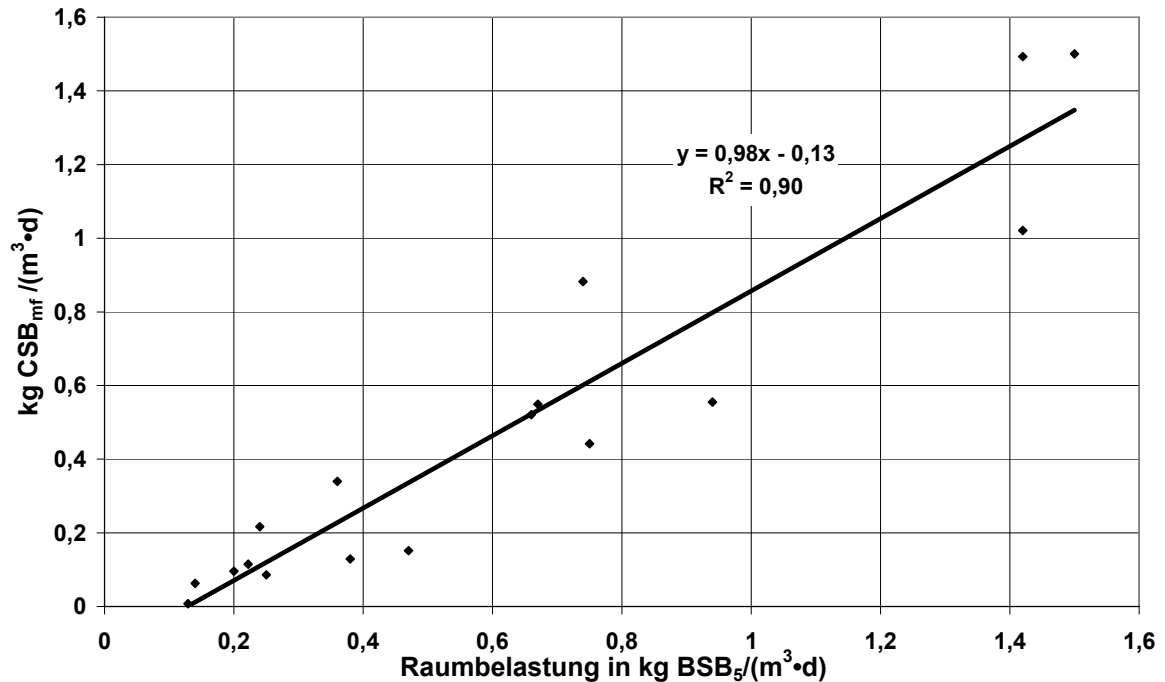


Abbildung 7.24: Einfluss der BSB₅-Raumbelastung auf die Umsatzraten in der oberen Schicht des halbtechnischen Tropfkörpers bei einer Abwassertemperatur von 25 °C mit Kunststoff

Sowohl beim Lavaschlacke-Tropfkörper als auch beim Kunststoff-Tropfkörper wurde eine gute Korrelation zwischen den Umsatzraten in der oberen Tropfkörperschicht und der momentanen Raumbelastung gefunden.

7.4 Reinigungsleistung im Tagesverlauf

Wie in Abschnitt 5.3 beschrieben, erfolgte eine zweiwöchige Intensivmessphase zur Erhebung dynamischer Daten für die Computer-Simulation des halbtechnischen Tropfkörpers, die von der Universität Emden/Oldenburg ebenfalls im Rahmen des BMBF-Verbundprojekts „Exportorientierte Forschung & Entwicklung Teil II – Abwasserbehandlung und Wasserwiederverwendung“ durchgeführt wird.

Pro Woche wurden 2h-Mischproben an drei aufeinander folgenden Tagen entnommen und analysiert. An den anderen Tagen erfolgte die Beprobung über 24h-Mischproben. Der Tropfkörper wurde in diesen zwei Wochen mit einer durchschnittlichen BSB₅-Raumbelastung von 0,22 kg BSB₅/(m³·d) betrieben. Die Messungen begannen ca. 5 Monate nach dem Abschluss der in Abschnitt 7.1 beschriebenen Versuchsphasen.

Aus Abbildung 7.25 kann der Verlauf der BSB₅-Raumbelastung und des CSB_{mf} im Ablauf des Lavaschlacke- und Kunststoff-Tropfkörpers vom 01.05.07 bis 03.05.07 entnommen werden.

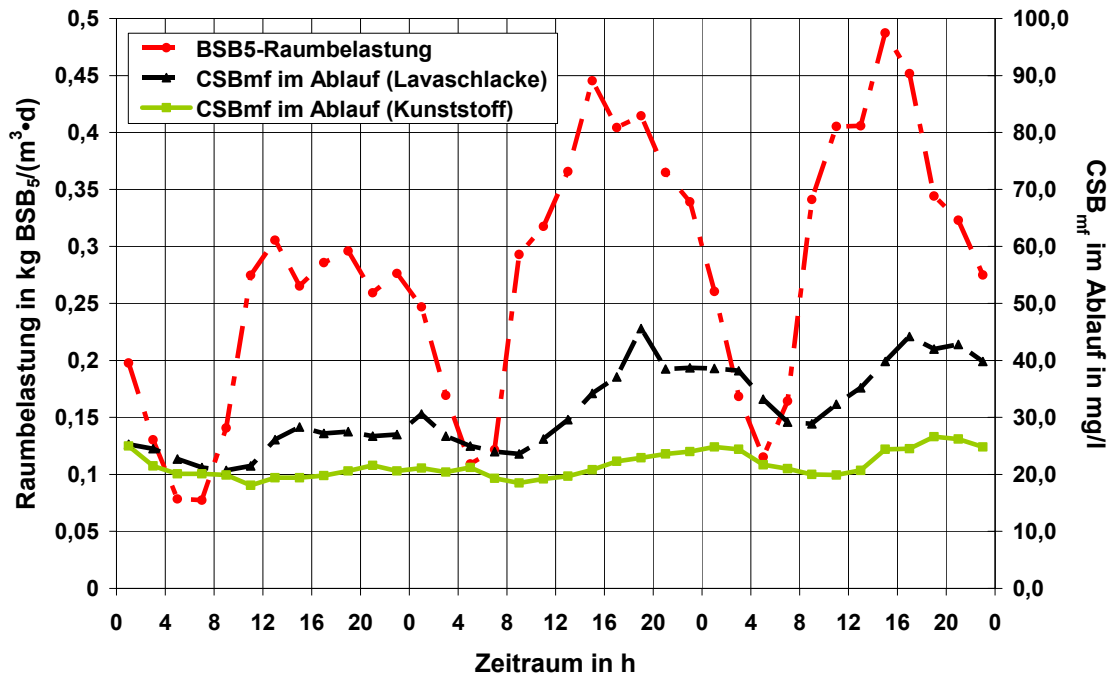


Abbildung 7.25: Verlauf der BSB₅-Raumbelastung im Zulauf und des CSB_{mf} im Ablauf für den halbtechnischen Tropfkörper bei einer Abwassertemperatur von 25 °C vom 01.05.07 bis 03.05.07

Vom 01.05.07 bis 03.05.07 erreichten die mittleren BSB₅-Raumbelastungen Werte von 0,22; 0,30 bzw. 0,31 kg BSB₅/(m³·d). Ein Anstieg der Ablaufwerte mit etwas Verzögerung nach den Spitzenraumbelastungen ist erkennbar. Zusätzlich ist zu erkennen, dass das Kunststofffüllmaterial im Vergleich mit der Lavaschlacke die Belastungsspitze besser puffert. Zudem wies das Kunststofffüllmaterial eine bessere Reinigungsleistung über den gesamten Zeitraum auf. Im Tagesmittel erreichten die CSB_{mf}-Ablaufwerte der Lavaschlacke Werte von 25; 32 bzw. 37 mg/l. Die CSB_{mf}-Ablaufwerte des Kunststofffüllmaterials erreichten 21; 21 bzw. 23 mg/l.

Abbildung 7.26 stellt die NH₄-N-Ablaufwerte beider Füllmaterialien gegen die TKN-Raumbelastungen im selben Zeitraum dar. Die NH₄-N-Ablaufkonzentrationen wurden mit Hilfe von online Hach-Lange-Analysen bestimmt.

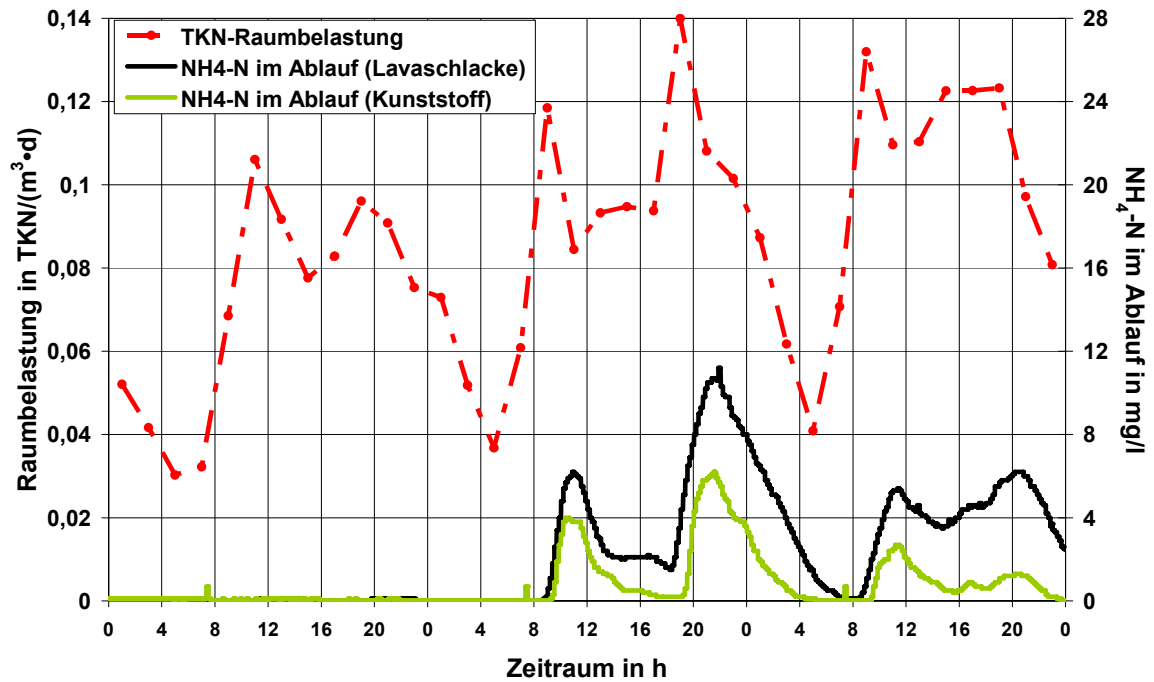


Abbildung 7.26: Verlauf der TKN-Raumbelastung im Zulauf und des $\text{NH}_4\text{-N}$ im Ablauf für den halbtechnischen Tropfkörper bei einer Abwassertemperatur von $25\text{ }^\circ\text{C}$ vom 01.05.07 bis 03.05.07

Die mittlere TKN-Raumbelastungen erreichten Werte von $0,070$; $0,088$ bzw. $0,097\text{ kg TKN}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$. Am 01.05.07 waren die Analyser defekt. Die bessere Reinigungsleistung des Kunststofffüllmaterials an den darauffolgenden Tagen ist erneut zu erkennen. Im Tagesmittel erreichten die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentrationen im Ablauf der Lavaschlacke $3,1\text{ mg/l}$ am 02.05.07 bzw. $3,8\text{ mg/l}$ am 03.05.07. Die entsprechenden Werte für das Kunststofffüllmaterial lagen bei $1,4\text{ mg/l}$ bzw. $0,9\text{ mg/l}$.

Abbildung 7.27 stellt die CSB_{mf} -Ablaufwerte für den Lavaschlacke- und den Kunststoff-Tropfkörper vom 13.05.07 bis 14.05.07 dar.

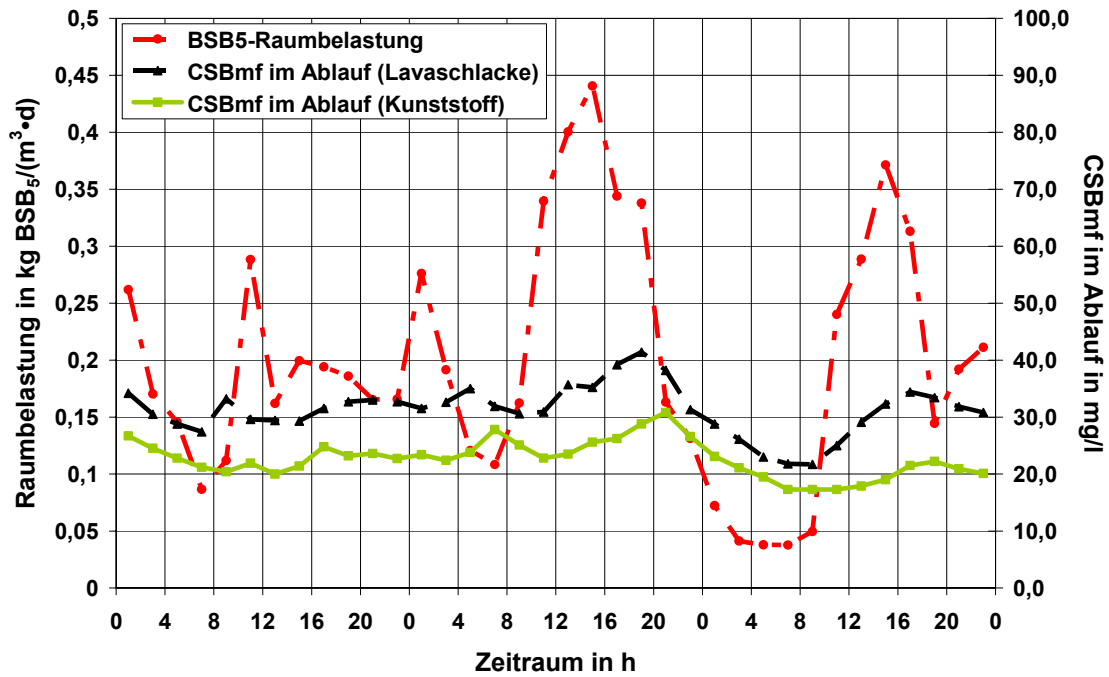


Abbildung 7.27: Verlauf der BSB₅-Raumbelastung im Zulauf und des CSB_{mf} im Ablauf für den halbtechnischen Tropfkörper bei einer Abwassertemperatur von 25 °C vom 13.05.07 bis 15.05.07

Vom 13.05.07 bis 15.05.07 erreichten die mittleren BSB₅-Raumbelastungen Werte von 0,18; 0,25 bzw. 0,17 kg BSB₅/(m³·d). Die CSB_{mf}-Ablaufwerte für die Lavaschlacke erreichten Werte von 31; 35 bzw. 28 mg/l. Die CSB_{mf}-Ablaufwerte des Kunststofffüllmaterials erreichten Werte von 23; 26 bzw. 20 mg/l. Zu- und Ablaufwerte zeigen im Allgemeinen einen ähnlichen Verlauf wie in der Woche davor.

In Abbildung 7.28 wurden die NH₄-N-Werte im Ablauf gegen die TKN-Raumbelastungen vom 13.05.07 bis 15.05.07 aufgetragen.

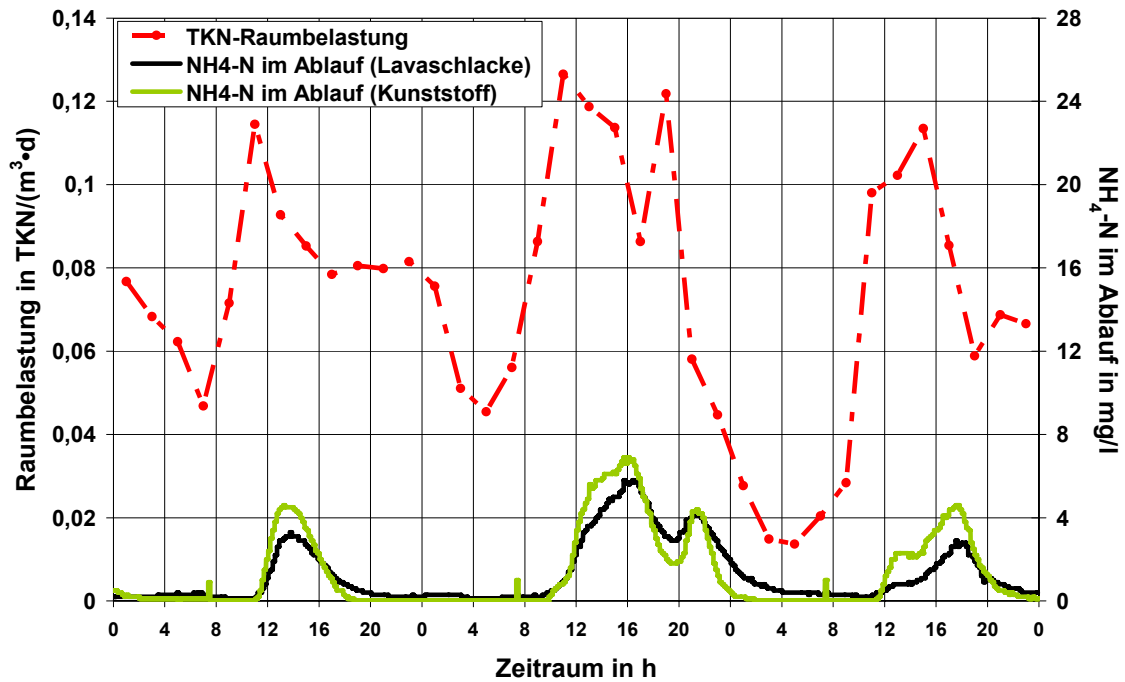


Abbildung 7.28: Verlauf der TKN-Raumbelastung im Zulauf und des $\text{NH}_4\text{-N}$ im Ablauf für den halbtechnischen Tropfkörper bei einer Abwassertemperatur von 25°C vom 13.05.07 bis 15.05.07

Die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Ablaufwerte für die Lavaschlacke in dieser Woche betragen 0,75; 2,14 bzw. 0,89 mg/l. Im Vergleich zur vorherigen Woche ist es deutlich sichtbar, dass die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Ablaufwerte für die Lavaschlacke niedriger sind. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Raumbelastungen am 02.05.07 und 03.05.07 größer waren als diejenigen der Woche darauf (zwischen 13.05.07 und 15.05.07 erreichten die Raumbelastungen Werte von 0,078, 0,082 bzw. 0,058 $\text{kg TKN}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$).

Andererseits änderten sich die Ablaufwerte des Kunststofffüllmaterials nur wenig im Vergleich zur Woche davor. Die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Ablaufwerte für das Kunststofffüllmaterial in dieser Woche erreichten 0,80; 2,11 bzw. 1,04 mg/l. Die geringere Empfindlichkeit der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Elimination beim Kunststoff-Tropfkörper gegenüber der Schwankung der Raumbelastung im untersuchten Bereich bestätigt die in Abbildung 7.7 gezeigten Ergebnisse.

Darüber hinaus wird aus Abbildung 7.26 und Abbildung 7.28 deutlich, dass Belastungsspitzen bei momentanen TKN-Raumbelastungen nur schlecht abgepuffert werden und somit kurzzeitig zu einer Erhöhung der Ablaufwerte führen können. Dies ist auch eine Erklärung dafür, dass bei im Mittel höherer Raumbelastung eine stärkere Streuung der Ablaufwerte zu verzeichnen ist (siehe Abbildung 7.8).

7.5 Schlamm und Biofilm

7.5.1 Biomassenwachstum und Überschussschlammproduktion

Um die Biofilmdicke einschätzen zu können, wurde wie in Abschnitt 5.4.5 beschrieben das Gewicht einer Füllmaterialprobe von jedem Füllmaterial regelmäßig aus dem Tropfkörper entnommen und ausgewogen. Aus Abbildung 7.29 können die Ergebnisse der Erfassung der Füllprobengewichte im Laufe der Versuche im Zusammenhang mit den angesetzten Spülkräften entnommen werden.

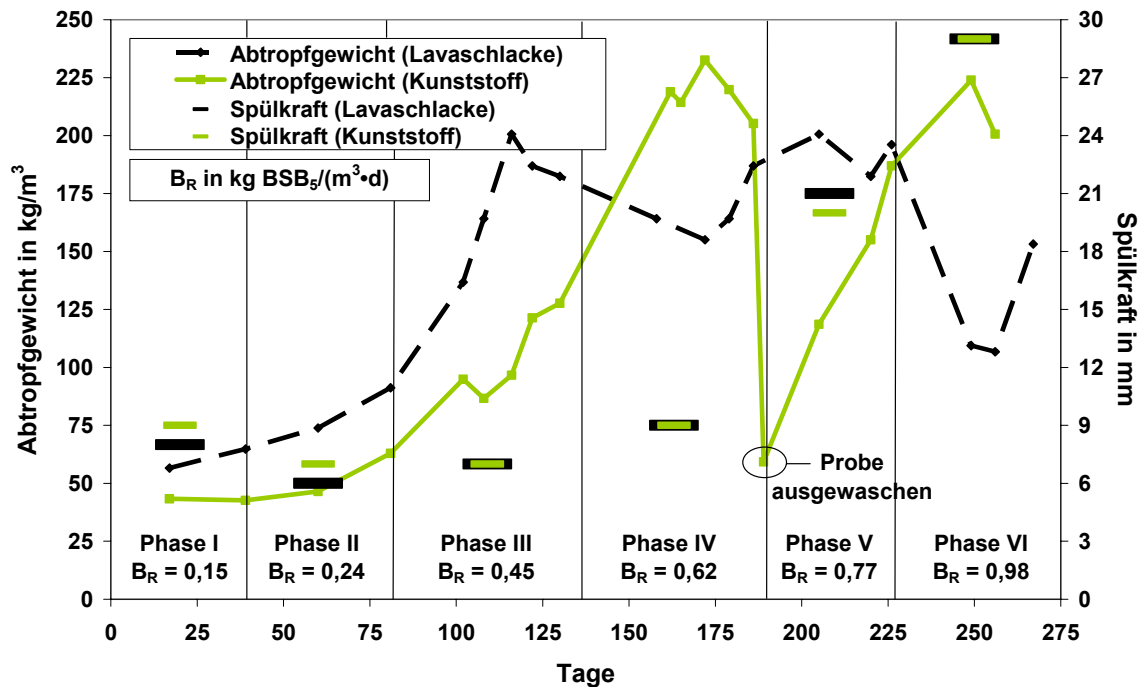


Abbildung 7.29: Abtropfgewicht des Biofilms für Füllmaterialproben auf ca. 1 m Höhe über dem Gitterboden des halbtechnischen Tropfkörpers im Laufe der Versuche

Die Ergebnisse zeigen in den Anfangsphasen eine deutliche Abhängigkeit zwischen der BSB_5 -Raumbelastung und dem Abtropfgewicht. Der Schlamm akkumulierte ständig im Tropfkörper mit Lavaschlacke bis Mitte der dritten Phase bzw. mit Kunststoff bis Mitte der vierten Phase, wo ein stabiler Wert (ca. fünffach höher als der Anfangswert) erreicht wurde. Zu diesem Zeitpunkt konnte visuell eine starke Verschlammung des Füllmaterialies festgestellt werden, welche zu lokalen Verstopfungen und zur Pfützenbildung in den Füllmaterialproben führte. Wichtig hervorzuheben ist, dass das Erreichen eines mehr oder weniger stabilen Werts kein Zeichen dafür war, dass sich der Schlamm im Tropfkörper nicht mehr akkumulierte, da die Füllmaterialproben nicht für das ganze Tropfkörpervolumen repräsentativ waren. Die Effekte der Akkumulation des Schlammes im Tropfkörper sind in den Messungen der Tropfzeit (siehe Abschnitt 7.6) und der Belüftung (siehe Abschnitt 7.7) zu beobachten.

Da das Gewicht der Kunststofffüllmaterialprobe aufgrund der hohen Schlammmenge zum Ende der Phase V nur mit vielen Schwierigkeiten erfasst werden konnte, wurde die Probe ausgewaschen. Nichtsdestotrotz war die Schlammmenge in der Probe innerhalb kurzer Zeit wieder so hoch wie zuvor. In der Phase V wurde versucht, den Schlammaustrag mit der Erhöhung der Spülkraft für jedes Füllmaterial auf ca. 20 mm zu erhöhen. In der Phase VI wurde die Spülkraft erneut auf ca. 29 mm erhöht.

Die Wirkung des Anstiegs der Spülkraft kann aus Abbildung 7.29 erst in der Phase VI durch die Reduzierung des Abtropfgewichts der Lavaschlacke-Füllmaterialprobe festgestellt werden. Für das Kunststofffüllmaterial war die Erhöhung der Spülkraft durch das Abtropfgewicht nicht zu beobachten.

Um den Einfluss der Spülkraft direkt auf den Austrag von Feststoffen zu ermitteln, wurde die Überschussschlammproduktion wie in der Referenzphase (siehe Abschnitt 6.2) aus der Summe des Überschussschlammes und der abfiltrierbaren Stoffe im Ablauf ermittelt. In Abbildung 7.30 bzw. Abbildung 7.31 ist die spezifische Überschussschlammproduktion (g ÜS / g BSB_{5,elim} bzw. g ÜS / g CSB_{elim}) und die Spülkräfte für jede Phase und jedes Füllmaterial dargestellt.

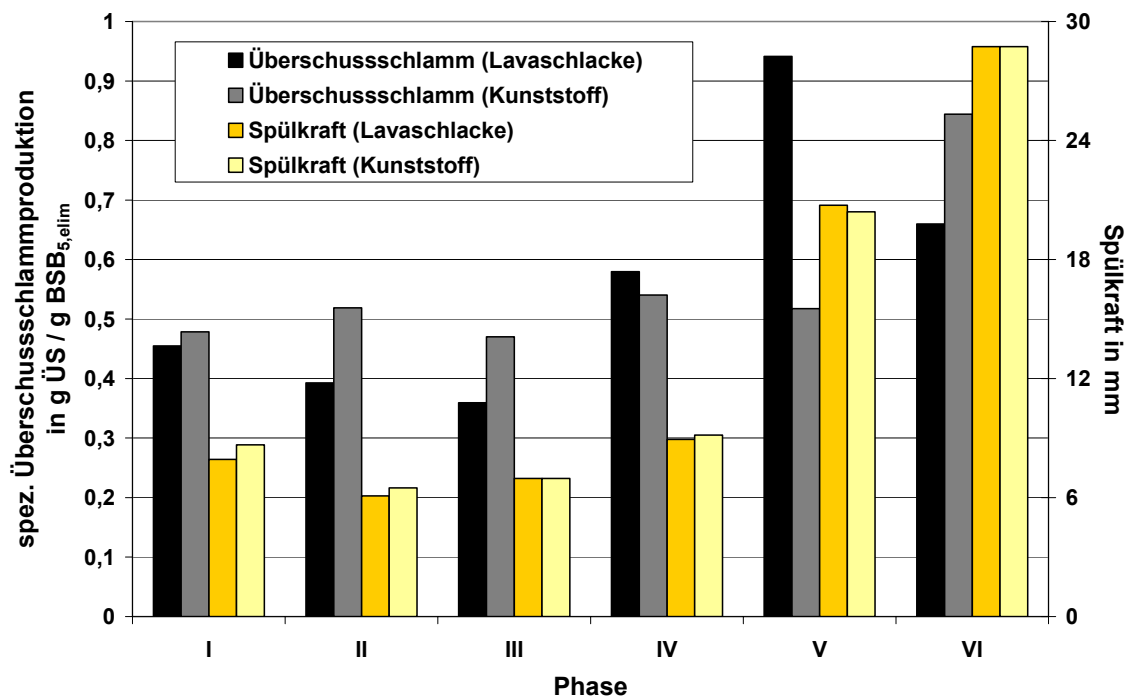


Abbildung 7.30: Spezifische Überschlammproduktion im Zusammenhang mit der Spülkraft für den halbtechnischen Tropfkörper im Laufe der Versuche

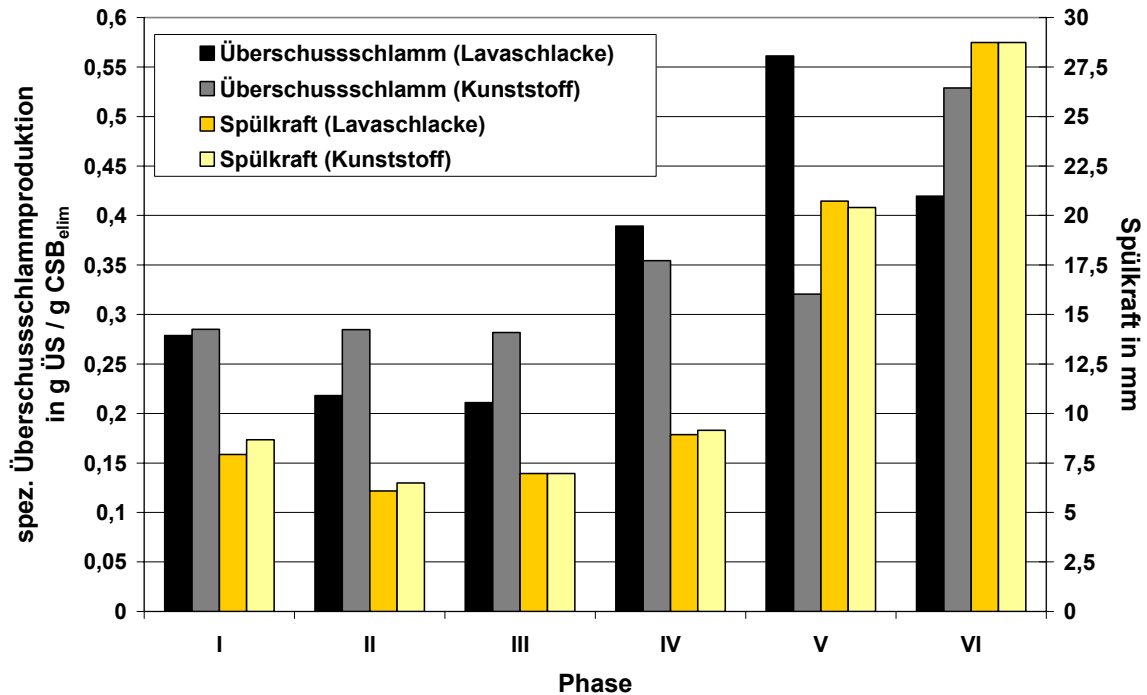


Abbildung 7.31: Spezifische Überschlammproduktion im Zusammenhang mit der Spülkraft für den halbtechnischen Tropfkörper im Laufe der Versuche

Aus Abbildung 7.30 bzw. Abbildung 7.31 ist festzustellen, dass die Erhöhung der Spülkraft auf 20 mm in der Phase V eine deutliche Zunahme des Schlammaustrags des Lavaschlacke-Tropfkörpers bewirkte. In der Phase VI war die Schlammproduktion für die Lavaschlacke trotz noch höherer Spülkraft (29 mm) kleiner als im Vergleich zur Phase V. Für den kunststoffgefüllten Tropfkörper erhöhte sich die Überschussschlammproduktion in der Phase V mit der Erhöhung der Spülkraft nicht. Erst in der Phase VI mit erneuter Erhöhung ist dies festzustellen.

Ein ausführlicher Zusammenhang zwischen Spülkraft und Schlammaustrag kann nur durch eine langfristige Betrachtung des Tropfkörpers ohne Änderung der Betriebseinstellungen und Raumbelastungen bekommen werden. Im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen war dies nicht möglich.

Die mittlere Überschussschlammproduktion bezogen auf die gesamte Versuchszeit ergab sich für beide Füllmaterialien zu 0,62 g ÜS / g BSB_{5,elim} bzw. 0,38 g ÜS / g CSB_{elim}. Da die Überschussschlammproduktion mit zunehmender Raumbelastung auch zunimmt, wäre es erforderlich, die Bemessung der Nachklärbecken in Bezug auf die Schlammvolumenbeschickung vorzunehmen.

Der Glühverlust im Laufe der Versuche kann aus Abbildung 7.32 entnommen werden.

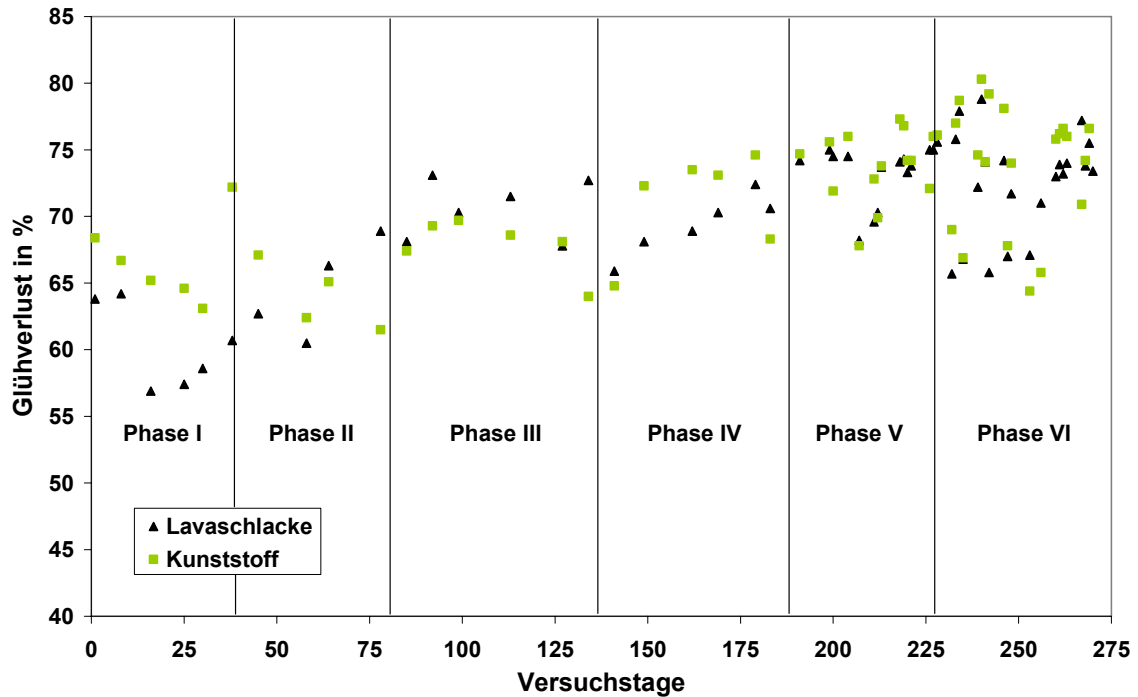


Abbildung 7.32: Glühverlust des Überschussschlammes vom halbtechnischen Tropfkörper im Laufe der Versuche

Es ist zu beobachten, dass der Glühverlust bei beiden Füllmaterialien mit zunehmender Raumbelastung zunahm. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass mit zunehmender Raumbelastung die mittlere Schlammaufenthaltszeit kürzer wurde und somit die Mineralisierung des Schlammes abnahm. Es ist kein Unterschied zwischen beiden Füllmaterialien zu erkennen. In der Phase I lag der Glühverlust zwischen ca. 55 und 70 %, in der Phase VI lag der Glühverlust zwischen ca. 65 und 80 %.

7.5.2 Schlamm- und Biofilmeigenschaften

Der Biofilm sah bei niedriger und hoher organischer Belastung unterschiedlich aus. Um dies darzustellen, werden in diesem Abschnitt Bilder des Kunststofffüllmaterials im unteren und oberen Tropfkörperbereich bei niedriger und hoher Raumbelastung gezeigt. Die Bilder bei hoher Raumbelastung wurden am Ende der Phase VI (ca. $0,98 \text{ kg BSB}_5/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$) gemacht, die Bilder bei niedriger Belastung wurden erst ca. 6 Monaten später gemacht. In der Zwischenzeit wurde der Tropfkörper im Rahmen der Versuche mit versäuertem Abwasser und der Intensivmessphase bei niedriger Raumbelastung (ca. $0,21 \text{ kg BSB}_5/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$) betrieben (siehe Abschnitt 5.3).

Der Schlamm der oberen Tropfkörperschicht wird mit der Zeit in die untere Schicht auf den dort existierenden Biofilm verlagert und führt dazu, dass der Biofilm im unteren Bereich eine unhomogene Oberfläche aufweist. Dies konnte insbesondere in der Füllmaterialprobe bei hoher Raumbelastung beobachtet werden (Abbildung 7.33).



Abbildung 7.33: Biofilm in der Füllmaterialprobe (1 m über dem Gitterrost) des halbtechnischen Tropfkörpers mit Kunststofffüllmaterial bei ca. $0,98 \text{ kg BSB}_5/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ am 16.11.2006

Wie aus Abbildung 7.33 zu erkennen ist, sah der Biofilm bei hoher Raumbelastung bröckelig und unregelmäßig aus. Zudem konnten Pfützen in den Füllmaterialproben beobachtet werden, was ein Zeichen dafür ist, dass bei dem langfristigen Betrieb des Tropfkörpers möglicherweise Verstopfungsprobleme auftreten können (Abbildung 7.34). Bei niedriger Raumbelastung war der Biofilm im unteren Bereich dagegen extrem dünn und schwer zu erkennen (Abbildung 7.35).

Im Gegensatz zum unteren Bereich wies der Biofilm im oberen Bereich eine schleimige und homogene Struktur auf. Bei hoher Raumbelastung war er dick und auf der Aufwuchsfläche visuell gut verteilt (Abbildung 7.36). Bei niedrigerer Raumbelastung war er dünner und mit vielen Stellen ohne Biofilm (Abbildung 7.37).



Abbildung 7.34: Kunststofffüllmaterial im mittleren Tropfkörperbereich (ca. 0,75 m über dem Gitterrost) des halbtechnischen Tropfkörpers bei ca. 0,98 kg BSB₅/(m³·d) am 16.11.2006



Abbildung 7.35: Kunststofffüllmaterial im mittleren Tropfkörperbereich (ca. 0,75 m über dem Gitterboden) des halbtechnischen Tropfkörpers bei ca. 0,21 kg BSB₅/(m³·d) am 04.06.2007



Abbildung 7.36: Biofilm im oberen Bereich des halbtechnischen Tropfkörpers mit Kunststofffüllmaterial bei ca. $0,98 \text{ kg BSB}_5/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ am 16.11.2006



Abbildung 7.37: Biofilm im oberen Bereich des halbtechnischen Tropfkörpers mit Kunststofffüllmaterial bei ca. $0,21 \text{ kg BSB}_5/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ am 04.06.2007

Mit Hilfe eines an der Universität Stuttgart entwickelten Messgerätes (siehe Anhang II) wurde die Dicke des Biofilms des Kunststofffüllmaterials an einigen punktuellen Messstellen gemessen. Jede einzelne Messung ist jedoch nur für den gemessenen Punkt aussagekräftig. Um einen statistischen Wert zu bekommen, wäre es nötig, eine große Anzahl an Messungen in verschiedenen Höhen durchzuführen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Dicke allerdings nur an 30 Messstellen vom oberen Tropfkörperbereich am Ende der Phase VI (ca. $0,98 \text{ kg BSB}_5/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$) und ca. 6 Monate später bei ca. $0,21 \text{ kg BSB}_5/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ermittelt. Die Werte für den hoch belasteten Tropfkörper können aus Abbildung 7.38 entnommen werden.

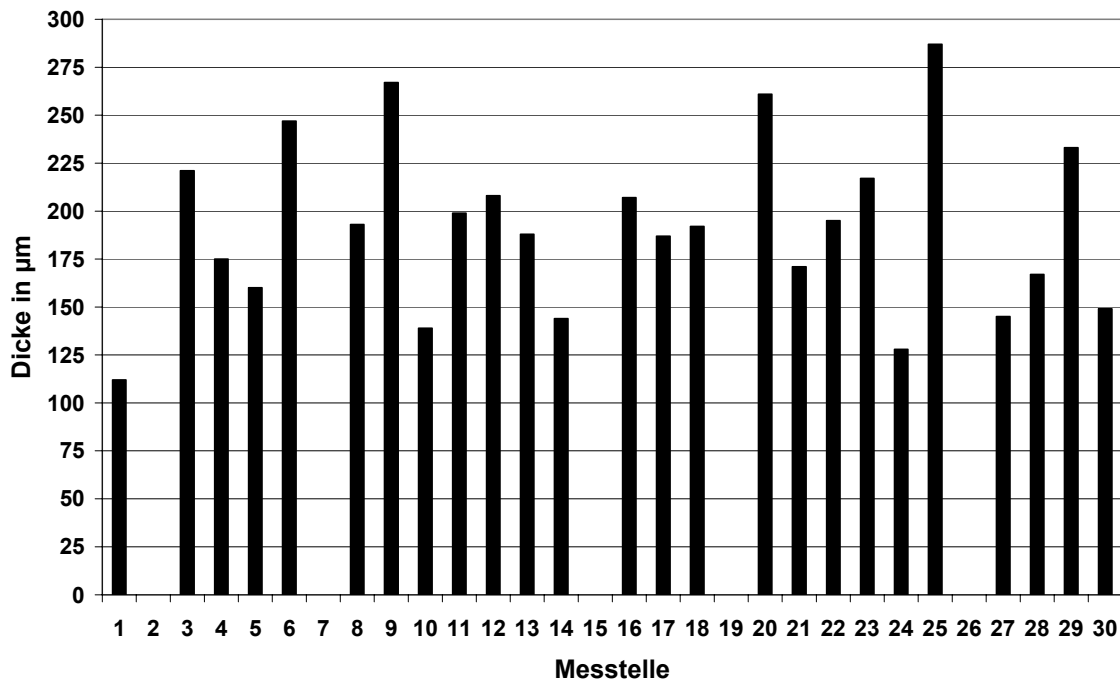


Abbildung 7.38: Biofilmdicke für verschiedene Messstellen im oberen Bereich des halbertechnischen Tropfkörpers mit Kunststofffüllmaterial bei ca. $0,98 \text{ kg BSB}_5/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$

Fünf der 30 Messstellen zeigten gar keinen Biofilm auf der Aufwuchsfläche. Von den Messstellen mit Biofilm wurden eine minimale Dicke von $112 \mu\text{m}$ und eine maximale Dicke von $287 \mu\text{m}$ ermittelt. Der Mittelwert lag bei ca. $192 \mu\text{m}$.

Bei den Messungen der Biofilmdicke ergab sich bei niedriger Raumbelastung, dass nur drei der 30 Messstellen einen messbaren Biofilm hatten (184 ; 78 und $81 \mu\text{m}$). An den meisten Messstellen konnte kein Biofilm festgestellt werden. Stattdessen war zu beobachten, dass eine große Anzahl an Larven im Biofilm siedelte. Durch mikroskopische Untersuchungen wurden sie als Larven von Tropfkörperfliegen (*Psychoda* sp.) identifiziert. Dadurch wurden eine Verschlechterung des CSB_{mf} im Ablauf und ein Einbruch der Nitrifikation bei beiden Füllmaterialien ausgelöst. Vor dem Tropfkörperfliegenbefall zeigte der Kunststoff-Tropfkörper $\text{NH}_4\text{-N}$ -Ablaufwerte unter 1 mg/l bzw. CSB_{mf} -Ablaufwerte unter 20 mg/l . Nach dem Befall wurden $18 \text{ mg NH}_4\text{-N/l}$ bzw. $30 \text{ mg CSB}_{\text{mf}}/\text{l}$ im Ablauf erreicht.

Der Lavaschlacke-Tropfkörper zeigte vor dem Befall $\text{NH}_4\text{-N}$ -Ablaufwerte unter 3 mg/l bzw. CSB_{mf} -Ablaufwerte unter 28 mg/l. Nach dem Befall wurden bis 9 mg $\text{NH}_4\text{-N/l}$ bzw. 33 mg $\text{CSB}_{\text{mf}/l}$ im Ablauf analysiert. In der Tat wurde der Kunststoff-Tropfkörper mehr als der Lavaschlacke-Tropfkörper von den Fliegen befallen. Dies konnte visuell bestätigt werden. Die höhere Empfindlichkeit des Kunststofffüllmaterials bezüglich der Fliegen kann auf seine größeren Poren zurückgeführt werden. Die Fliegen erreichten den Biofilm beim Kunststofffüllmaterial mit weniger Schwierigkeiten. Tropfkörperfliegen wurden auch in der unteren Schicht des Tropfkörpers für beide Füllmaterialien beobachtet. Um die Fliegen zu bekämpfen, wurde der Tropfkörper mit einem Fliegennetz bedeckt und regelmäßig mit Mückengift besprüht. Innerhalb von zwei Wochen war die Reinigungsleistung wieder auf ursprünglichem Niveau.

Unregelmäßige mikroskopische Untersuchungen zeigten neben Prokaryonten auch Eukaryonten im Biofilm. Bei beiden Füllmaterialien konnten Makroorganismen wie Öltröpfchenwürmer und Rädertierchen, die nach dem Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft (1999) auf ältere Biofilme hinweisen, beobachtet werden. Glockentier und Wasserflöhe waren ebenfalls oft zu sehen. Der Anstieg von Schwefel- und Methanobakterien mit zunehmender Raumbelastung deutete auf die Vergrößerung der anaeroben Bereiche von Phase zu Phase hin. Die Bakterienflocken schienen auf dem Kunststofffüllmaterial kompakter als bei der Lavaschlacke zu sein.

7.6 Tropfzeit

Am Ende jeder Phase wurde die Tropfzeit bei verschiedenen Flächenbeschickungen für jedes Füllmaterial wie in Abschnitt 5.4.4 beschrieben ermittelt. Die gewonnenen Messwerte ($q_A \times \zeta$) wurden mit der Gleichung $\zeta = K \cdot h_{\text{TK}} / (q_A^n)$ interpoliert (siehe Abschnitt 3.2.4).

Es wurde während den Messungen jedoch festgestellt, dass die Tropfzeit sehr von der Abwasserverteilung abhängig ist. Aus diesem Grund wurde versucht, von Phase zu Phase die Drehsprengerdüsen so anzupassen, dass die Verteilung einigermaßen gleichmäßig ist. Dafür wurden die Düsen je nach Phase zugeklammert bzw. offen gelassen. Diese Prozedur wurde am Anfang jeder Phase mit Ausnahme der Phase IV (im Laufe dieses Abschnitts ausführlicher beschrieben) vorgenommen. Die Bewertung der Qualität der Verteilung erfolgte visuell.

Abbildung 7.39 stellt am Beispiel für den Lavaschlacke-Tropfkörper in der Phase III die ermittelten Tropfzeiten für verschiedene Flächenbelastungen dar.

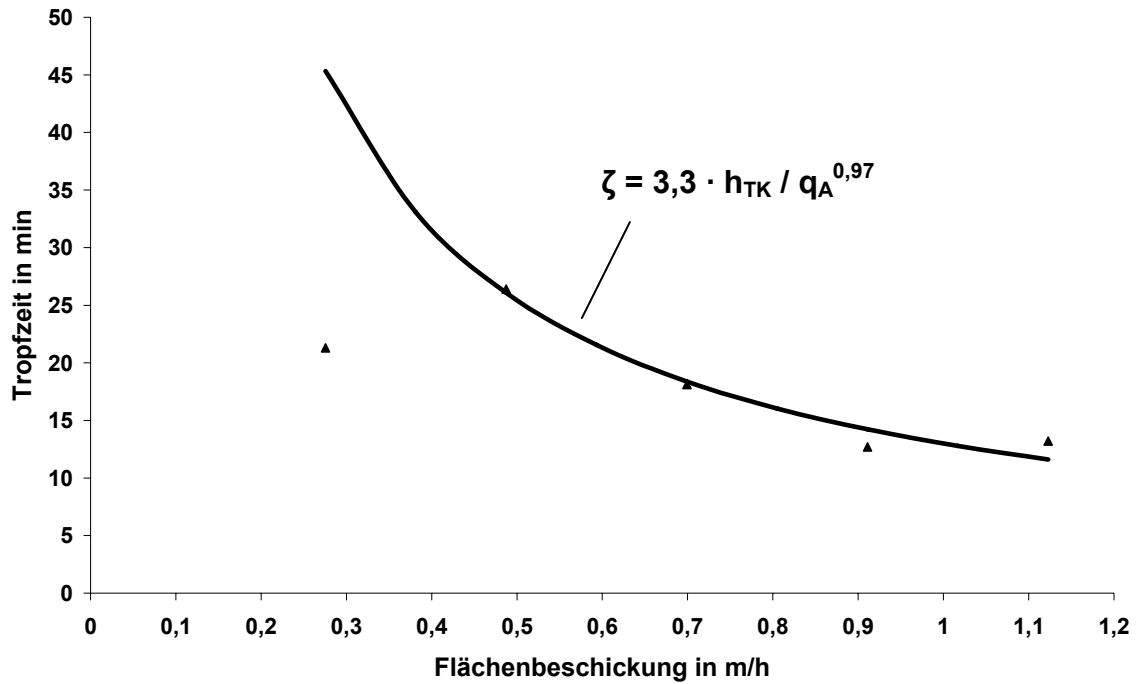


Abbildung 7.39: Tropfzeiten für verschiedene Flächenbeschickungen am Beispiel des halbtechnischen Tropfkörpers mit Lavaschlacke in der Phase III

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Tropfzeit bei 0,28 m/h nicht der Funktion $\zeta = K \cdot h_{TK} / (q_A^n)$ genügt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei kleineren Flächenbeschickungen bzw. geringerem Zulauf der Wasserstoß nicht stark genug ist, um das Wasser bis zum Ende des Drehsprengerarmes zu bringen. Dies hat zur Folge, dass bei kleineren Flächenbeschickungen das Tropfkörpervolumen unvollständig ausgenutzt wird. Dadurch war die Tropfzeit in der Phase III bei 0,28 m/h sogar niedriger als diejenige bei 0,49 m/h. Infolge der Anpassungen des Drehsprengers wurde dies in jeder Phase bei verschiedenen Flächenbeschickungen festgestellt.

Abbildung 7.40 zeigt die Zusammendarstellung der ermittelten Tropfzeiten für den Lavaschlacke-Tropfkörper in jeder Phase. Tabelle 7.2 gibt die für die Interpolation der Kurven gefundenen K- und n-Werte an. Die nicht korrelierten Punkte wurden dabei nicht berücksichtigt.

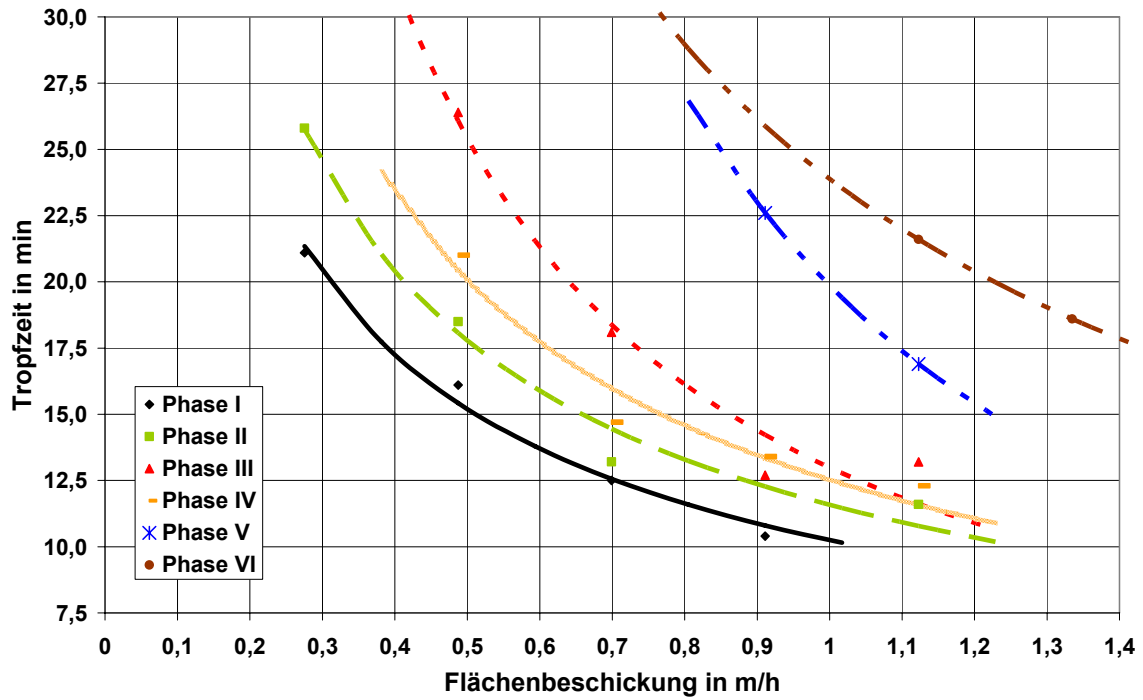


Abbildung 7.40: Tropfzeit in Abhängigkeit von der Flächenbeschickung für den halbtechnischen Tropfkörper mit Lavaschlacke im Laufe der Versuche

Tabelle 7.2: Koeffizienten der Gleichung $\zeta = K \cdot h_{TK} / (q_A^n)$ für die Berechnung der Tropfzeit des halbtechnischen Tropfkörpers mit Lavaschlacke in den verschiedenen Phasen

| Phase | K | n | Anzahl der Messungen |
|-------|-----|------|----------------------|
| I | 2,6 | 0,57 | 4 |
| II | 3,0 | 0,62 | 4 |
| III | 3,3 | 0,97 | 4 |
| IV | 3,2 | 0,68 | 4 |
| V | 5,1 | 1,39 | 2 |
| VI | 6 | 0,87 | 2 |

Die interpolierten Verläufe der Phasen I bis III zeigen eine von Phase zu Phase allmähliche Zunahme der Tropfzeiten auf. Die K- und n-Werte blieben nicht konstant, sondern stiegen entsprechend an. Gebert (2001) zeigte bereits, dass die Tropfzeit stark von der Dicke des Biofilms abhängig ist. Der Anstieg der Tropfzeiten kann daher auf die in Abschnitt 7.5.1 gezeigte Biomasseakkumulation zurückgeführt werden.

Da der Drehsprenger für den erforderlichen maximalen Abwasserfluss der nachfolgenden Phasen nicht ausgelegt wurde, musste er am Anfang der Phase IV komplett ausgewechselt werden. Der neue Drehsprenger hatte eine höhere Anzahl von Düsen,

welche wiederum einen größeren Durchmesser hatten. Die Düsen wurden am Anfang dieser Phase aus technischen Gründen zunächst ausnahmsweise nicht angepasst. Durch den Vergleich der Verläufe der Phasen III und IV ist zu sehen, dass sich die Tropfzeiten in der Phase IV trotz dickerem Biofilm (siehe Abschnitt 7.5.1) aufgrund des großen Wasserdurchlasses verminderten. In dieser Phase floss mehr Wasser durch das zentralere Volumen des Tropfkörpers, was durch die visuelle Beobachtung des stärkeren Biomassewachstums in der Mitte des Tropfkörpers bestätigt werden konnte. Der Drehsprenger wurde erst am Anfang der Phase V wieder angepasst.

Von Phase V bis VI wurde eine weitere Zunahme der Tropfzeiten gemessen. Die K-Werte stiegen weiter an. Der n-Wert stieg von Phase IV zu V an, sank aber von Phase V zu VI ab. Die Senkung des n-Wertes ist jedoch nicht statistisch gesichert, da in den Phasen V und VI nur eine geringe Anzahl an Messpunkte zur Verfügung stehen.

Die Dispersionszahlen D/ul (siehe Abschnitt 5.4.4) für den Lavaschlacke-Tropfkörper im Laufe der Versuche sind aus Tabelle 7.3 zu entnehmen.

Tabelle 7.3: Dispersionszahlen D/ul in Abhängigkeit der Flächenbeschickung für den halbtechnischen Tropfkörper mit Lavaschlacke im Laufe der Versuche

| q_A in m/h | Phase I | Phase II | Phase III | Phase IV | Phase V | Phase VI |
|--------------|---------|----------|-----------|----------|---------|----------|
| 0,28 | 0,04 | 0,13 | | | | |
| 0,49 | 0,14 | 0,08 | 0,50 | 0,08 | | |
| 0,70 | 0,36 | 0,20 | 0,26 | 0,11 | | |
| 0,91 | 0,57 | | 0,31 | 0,14 | 1,83 | |
| 1,12 | | 0,25 | 0,61 | 0,15 | 0,57 | 0,43 |
| 1,33 | | | | | | 0,29 |

In den Phasen I bis IV kann eine tendenzielle Erhöhung der Dispersionszahlen mit zunehmender Flächenbeschickung erkannt werden. Dies konnte aber in den Phasen V und VI teilweise infolge der geringen Anzahl der Messungen nicht bestätigt werden. Nach Rüdiger (1993) weisen Werte über 0,5 auf eine relativ hohe axiale Dispersion und somit ein Strömungsverhalten hin, welches sich in Richtung durchmischter Reaktoren orientiert. Die meisten Werte lagen jedoch unter 0,5.

In Abbildung 7.41 sind die ermittelten Tropfzeiten für den Kunststoff-Tropfkörper in jeder Phase dargestellt. Die nicht korrelierten Punkte wurden wie beim Lavaschlacke-Tropfkörper nicht berücksichtigt. Deren Anzahl war für das Kunststofffüllmaterial höher. Tabelle 7.4 gibt die bei der Interpolation der Kurven gefundenen K- und n-Werte an.

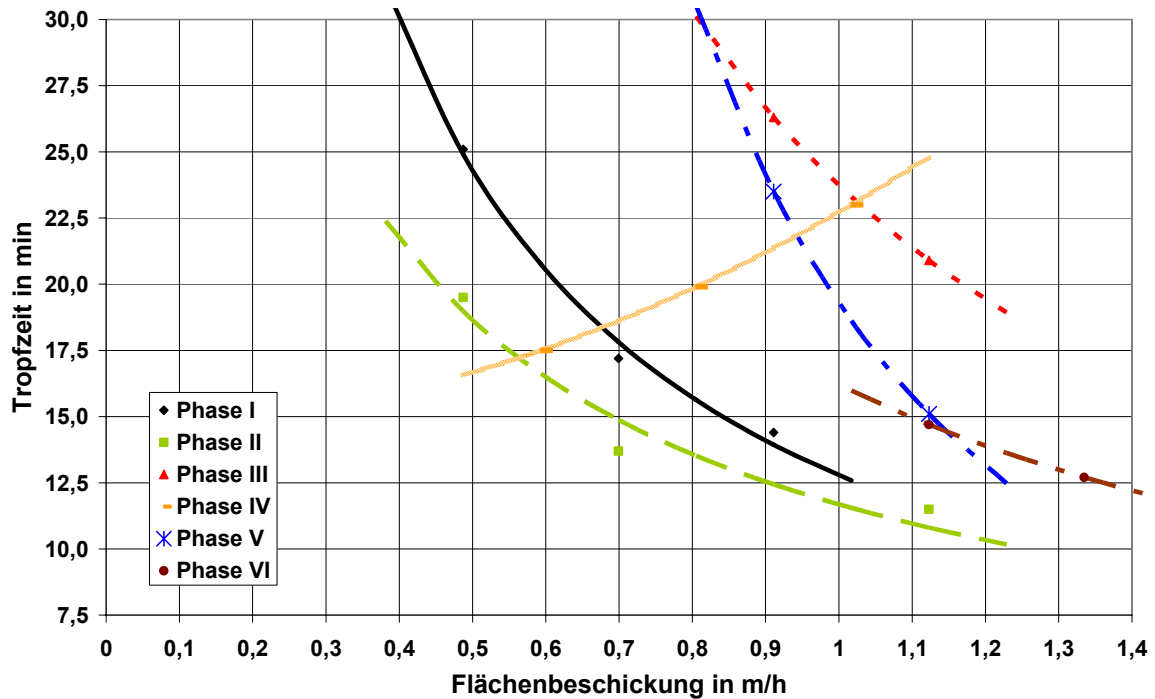


Abbildung 7.41: Tropfzeit in Abhängigkeit von der Flächenbeschickung für den halbtechnischen Tropfkörper mit Kunststoff im Laufe der Versuche

Tabelle 7.4: Koeffizienten der Gleichung $\zeta = K \cdot h_{TK} / (q_A^n)$ für die Berechnung der Tropfzeit des halbtechnischen Tropfkörpers mit Kunststoff in den verschiedenen Phasen

| Phase | K | n | Anzahl der Messungen |
|-------|-----|------|----------------------|
| I | 3,3 | 0.93 | 3 |
| II | 3,0 | 0.68 | 3 |
| III | 6,1 | 1.10 | 2 |
| IV | - | - | 3 |
| V | 4,9 | 2.16 | 2 |
| VI | 4,2 | 0.85 | 2 |

Die Abwasserverteilung scheint bei dem Kunststofffüllmaterial ein wichtiger Einflussfaktor für die Tropfzeit zu sein. Trotz der kontinuierlichen Zunahme der Biofilmdicke von Phase I bis III waren die Tropfzeiten der Phase II kleiner als diejenigen der Phasen I.

Aufgrund der schlechten Verteilung in der Phase IV trat sogar eine Erhöhung der Tropfzeiten mit zunehmender Flächenbeschickung auf. Trotz der visuellen Anpassung des Drehsprengers und des dickeren Biofilms in der Phase V waren die Tropfzeiten immer noch kleiner als diejenigen der Phase III. Im Allgemeinen konnte kein

Zusammenhang zwischen den K- und n-Werten der verschiedenen Phasen gefunden werden.

Die Wasserverteilung ist daher für das Kunststofffüllmaterial besonders wichtig. Visuell war zu beobachten, dass die einzelnen Wasserstrahlen in das Kunststofffüllmaterial in der Regel direkt in die Kunststoffwaben hinein flossen. Bei dem Lavaschlacke-Tropfkörper spritzen die Wasserstrahlen von den Steinen weg bevor sie in den Füllkörper sickern, was bei der Wasserverteilung hilfreich ist. Eine Feinverteilung des Drehsprengers (z.B mit Prallblechen) wäre in diesem Sinne wichtiger für das Kunststofffüllmaterial als für die Lavaschlacke.

Die ermittelten Dispersionszahlen D/ul für den Kunststoff-Tropfkörper im Laufe der Versuche sind in Tabelle 7.5 dargestellt.

Tabelle 7.5: Dispersionszahlen D/ul in Abhängigkeit der Flächenbeschickung für den halbtechnischen Tropfkörper mit Kunststofffüllmaterial im Laufe der Versuche

| q_A in m/h | Phase I | Phase II | Phase III | Phase IV | Phase V | Phase VI |
|--------------|---------|----------|-----------|----------|---------|----------|
| 0,49 | 0,07 | 0,07 | | 0,08 | | |
| 0,70 | 0,32 | 0,14 | | 0,09 | | |
| 0,91 | 0,27 | | 0,12 | 0,14 | 0,14 | |
| 1,12 | | 0,27 | 0,26 | | 0,33 | 0,14 |
| 1,33 | | | | | | 0,94 |

Eine tendenzielle Erhöhung der Dispersionszahlen mit zunehmender Beschickung kann festgestellt werden. Es ist zu erkennen, dass im Vergleich mit der Lavaschlacke die Dispersionszahlen des Kunststofffüllmaterials tendenziell kleiner sind. Dieser Vergleich kann jedoch nur bedingt gemacht werden, da die Biofilmdicke im gesamten Tropfkörper für beide Füllmaterialien im Laufe der Versuche unbekannt ist und die Verteilung war offensichtlich schlecht für das Kunststofffüllmaterial. Der Einfluss der Biofilmdicke auf die Dispersionszahlen in der Literatur wird in Abschnitt 3.2.4 beschrieben.

Aus den in Abbildung 7.40 und Abbildung 7.41 interpolierten Linien können die Tropfzeiten bei den mittleren Flächenbeschickungen von jeder Phase hergeleitet werden. In Abbildung 7.42 sind diese für den Lavaschlacke- und den Kunststoff-Tropfkörper dargestellt.

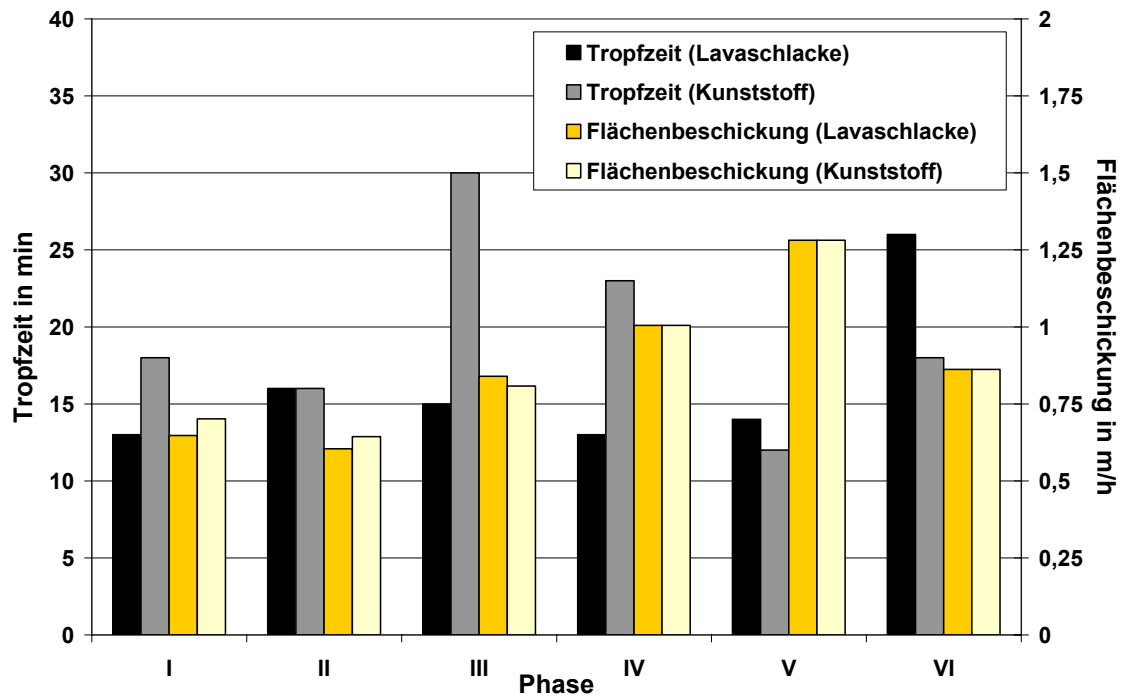


Abbildung 7.42: Tropfzeit und Flächenbeschickung für den halbtechnischen Tropfkörper im Laufe der Versuche

Trotz seiner höheren Empfindlichkeit gegenüber der Wasserverteilung zeigte das Kunststofffüllmaterial oft höhere Tropfzeiten als die Lavaschlacke. Der Lavaschlacke-Tropfkörper zeigte zwischen den Phasen I bis V trotz zunehmender Flächenbeschickung annähernd dieselben Tropfzeiten (zwischen 13 und 16 min). Die akkumulierte Biomasse glied also die Erhöhung der Flächenbeschickung aus, indem die höheren Wassermengen durch höhere Biomassemengen sickern mussten. In der Phase VI war die Tropfzeit wesentlich höher (ca. 26 min).

Die hergeleiteten Tropfzeiten für das Kunststofffüllmaterial zeigen infolge der verschiedenen Qualitäten der Abwasserverteilung in den verschiedenen Phasen höhere Schwankungen. In den Phasen III und IV waren sie durchschnittlich höher (30 bzw. 23 min). In den restlichen Phasen schwankten sie zwischen 12 und 18 min.

Hohe Tropfzeiten sind vorteilhaft für die Reinigungsleistung im Tropfkörper. In den Phasen III und IV konnten beim Kunststofffüllmaterial aufgrund von hohen Tropfzeiten eine hohe Stabilität der CSB-Elimination (Abbildung 7.5 und Abbildung 7.6) bzw. der N_{ges} -Elimination (Abbildung 7.11) sowie eine hohe NH_4 -Elimination (siehe Abschnitt 7.2.3) festgestellt werden.

7.7 Belüftung

Die Luftströmung durch den Tropfkörper wurde am Ende von jeder Phase für verschiedene Temperaturdifferenzen (Luft – Wasser) wie in Abschnitt 5.4.6 beschrieben

erfasst. Abbildung 7.3 stellt am Beispiel der Phase IV eine solche Messung dar. Positive Werte an der vertikalen Achse geben eine aufsteigende Luftbewegung innerhalb des Tropfkörpers und umgekehrt an.

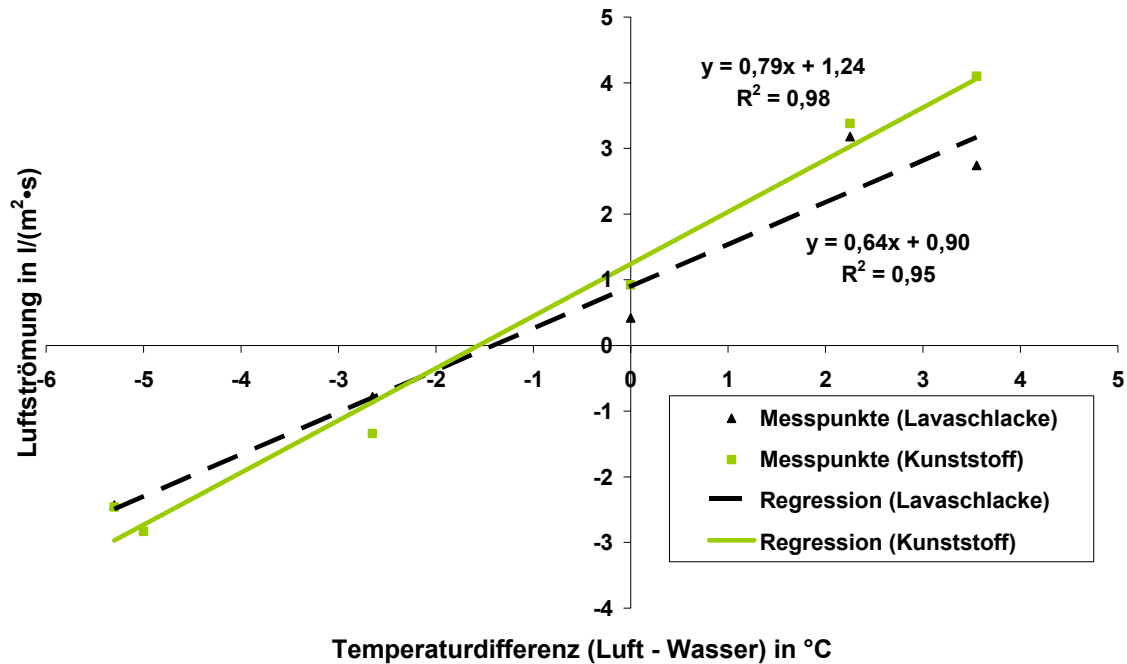


Abbildung 7.43: Luftströmung in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zwischen Luft und Wasser für den halbtechnischen Tropfkörper in der Phase IV

Für die anderen Phasen wurde die Luftströmung auf dieselbe Weise ermittelt. Es wurden in der Regel 5 Punkte für die Erstellung jeder Gerade verwendet. Die Bestimmtheitsmaße variierten alle zwischen 81 und 99%.

In Abbildung 7.44 und Abbildung 7.45 sind die hergeleiteten Regressionen für die Luftströmungsmessungen in Abhängigkeit von der Luft/Abwasser-Temperaturdifferenz für jede Phase für den Lavaschlacke- bzw. Kunststoff-Tropfkörper dargestellt. In der Phase II liegen keine Daten vor, da das Messgerät defekt war.

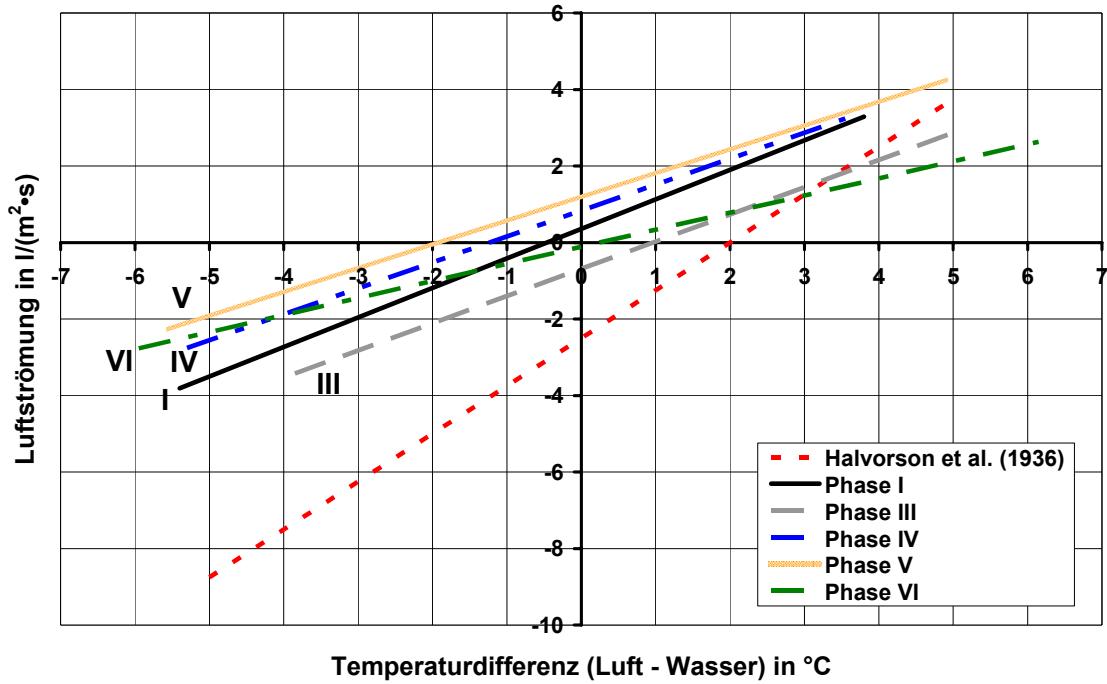


Abbildung 7.44: Luftströmung in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zwischen Luft und Wasser für den halbtechnischen Tropfkörper mit Lavaschlacke

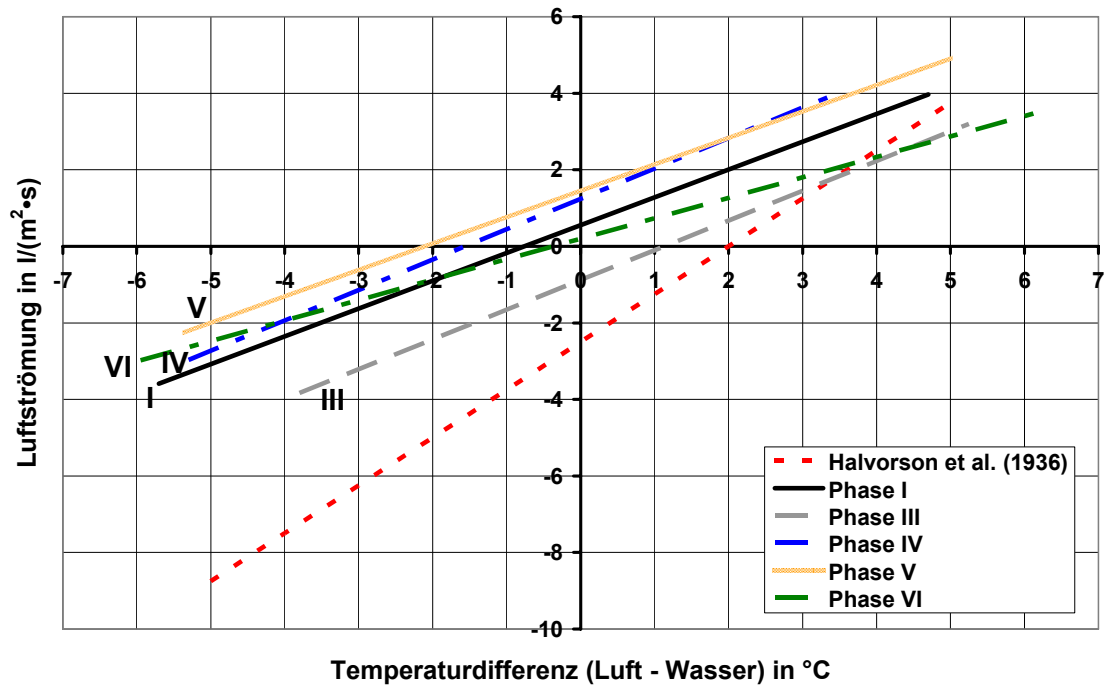


Abbildung 7.45: Luftströmung in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zwischen Luft und Wasser für den halbtechnischen Tropfkörper mit Kunststofffüllmaterial

Halvorson et al. (1936) stellten fest, dass der Punkt, bei dem die Luftrichtung umkehrt, bei einer Temperaturdifferenz von 2 °C (Luft – Wasser) auftritt. Dieser Punkt schwankte aleatorisch bei den durchgeführten Messungen zwischen -2 und 1 °C, war aber von Phase zu Phase für beide Füllmaterialien annähernd gleich. Die Luftfeuchtigkeit kann hierbei eine Rolle spielen (siehe Abschnitt 3.2.5).

Abbildung 7.46 gibt die interpolierten Neigungen der obigen Gerade in $l/(m^2 \cdot s) / \Delta T$ für jede Phase und jedes Füllmaterial an.

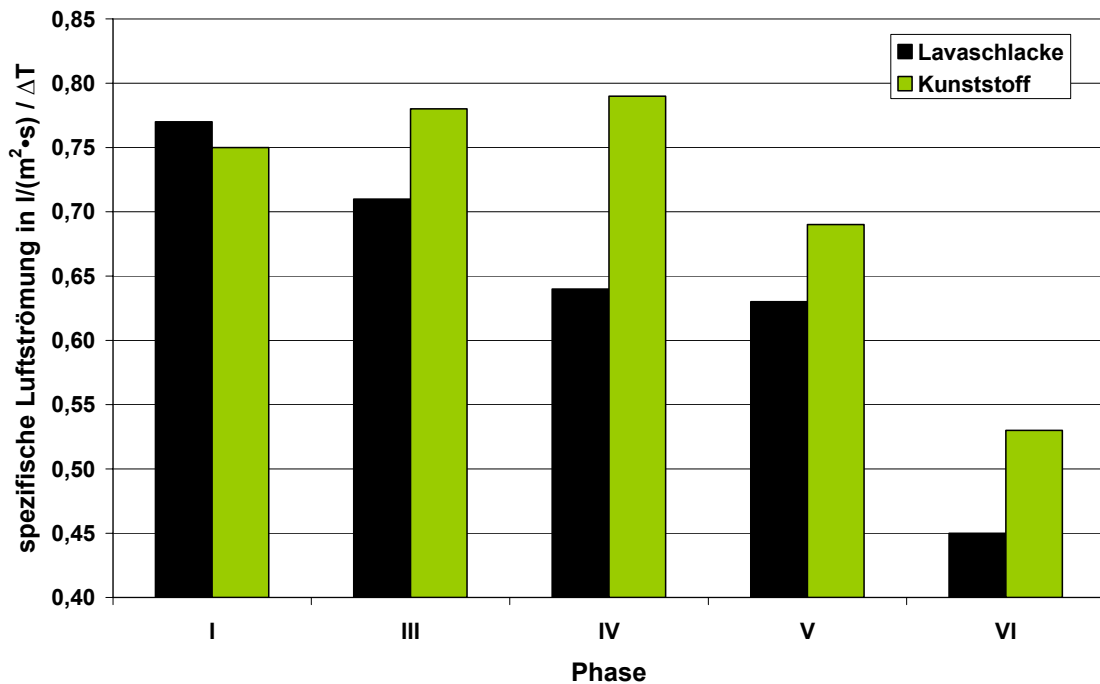


Abbildung 7.46: Spezifische Luftströmung im Laufe der Versuche für den halbtechnischen Tropfkörper

Die Ergebnisse machen deutlich, dass das Kunststofffüllmaterial mit Ausnahme der Phase I eine höhere spezifische Luftströmungen aufwies, was ein Zeichen dafür ist, dass dieses Füllmaterial im Laufe der Versuche besser belüftet wurde. Dies kann auf den größeren Hohlraumanteil dieses Füllmaterialies zurückgeführt werden.

Darüber hinaus ist festzustellen, dass die spezifische Luftströmung für den Lavaschlacke-Tropfkörper im Laufe der Versuche konstant absank. Für den Kunststoff-Tropfkörper fand ein geringfügiger Anstieg der spezifischen Luftströmung zwischen den Phasen I und IV statt. Die geringfügigen Abweichungen der Werte liegen jedoch innerhalb der Messungenauigkeit. In den nachfolgenden Phasen sank diese ebenfalls deutlich ab. Die starke Abnahme der spezifischen Luftströmung kann auf den Widerstand der mit der Zeit akkumulierten Biomasse im Tropfkörper (siehe Abschnitt 7.5.1) zurückgeführt werden. Die Steigerung der Spülkraft in den Phasen V und VI (siehe Abschnitt 7.5.1) und die

nachfolgende Verschiebung des Schlammes der oberen Tropfkörperschicht in die untere Schicht bewirkte wahrscheinlich vereinzelte Verstopfungen, was zur Erhöhung des Widerstands führte.

Beide Tropfkörper wurden mit einer konstanten Temperaturdifferenz (Luft – Wasser) von ca. 5 ° C betrieben. Nach den Geraden in Abbildung 7.44 und Abbildung 7.45 wurden beide Füllmaterialien mit mindestens ca. 3 l/(m²·s) in absteigender Richtung in jeder Phase belüftet. Eine Ausnahme bildet der Lavaschlacke-Tropfkörper in der Phase VI, welcher mit nur ca. 2 l/(m²·s) belüftet wurde.

Die Sauerstoffkonzentrationen im Ablauf der Nachklärungen erreichten in der Phase I Werte zwischen 4 und 6 mg O₂/l für beide Füllmaterialien. In den Phasen II bis V schwankten die Konzentrationen zwischen 2 bis 4 mg/l. Die hohen Werte in der Phase I können auf die hohe Rezirkulation zurückgeführt werden. Gleich nach der Erhöhung der Spülkraft auf 29 mm am Anfang der Phase VI reduzierten sich die Sauerstoffkonzentrationen drastisch auf Werte zwischen 0,5 und 2 mg/l. Dieses Phänomen dauerte ca. zwei Wochen. Danach erreichten die Konzentrationen das Niveau wie zuvor. Da der Anstieg der Spülkraft die Verschiebung der Biomasse der oberen Schicht in die untere Schicht bewirkte, kann die Verminderung des gelösten Sauerstoffs im Ablauf darauf zurückgeführt werden, dass Poren des Tropfkörpers verstopften. Ein deutlicher Zusammenhang zwischen Belüftung und Sauerstoff im Ablauf der Nachklärung konnte jedoch nicht beobachtet werden.

7.8 Geruchsentwicklung

Um zu überprüfen, inwieweit die Geruchsemission im Tropfkörperkörper von der organischen Belastung abhängig ist, wurde im Laufe der Versuche regelmäßig olfaktometrische Messungen in jeder Phase, wie im Abschnitt 5.4.7 beschrieben, durchgeführt. Die Proben wurden aus einem der unteren Belüftungsrohre von jedem Füllmaterial entnommen. Die Ergebnisse können aus Abbildung 7.47 entnommen werden.

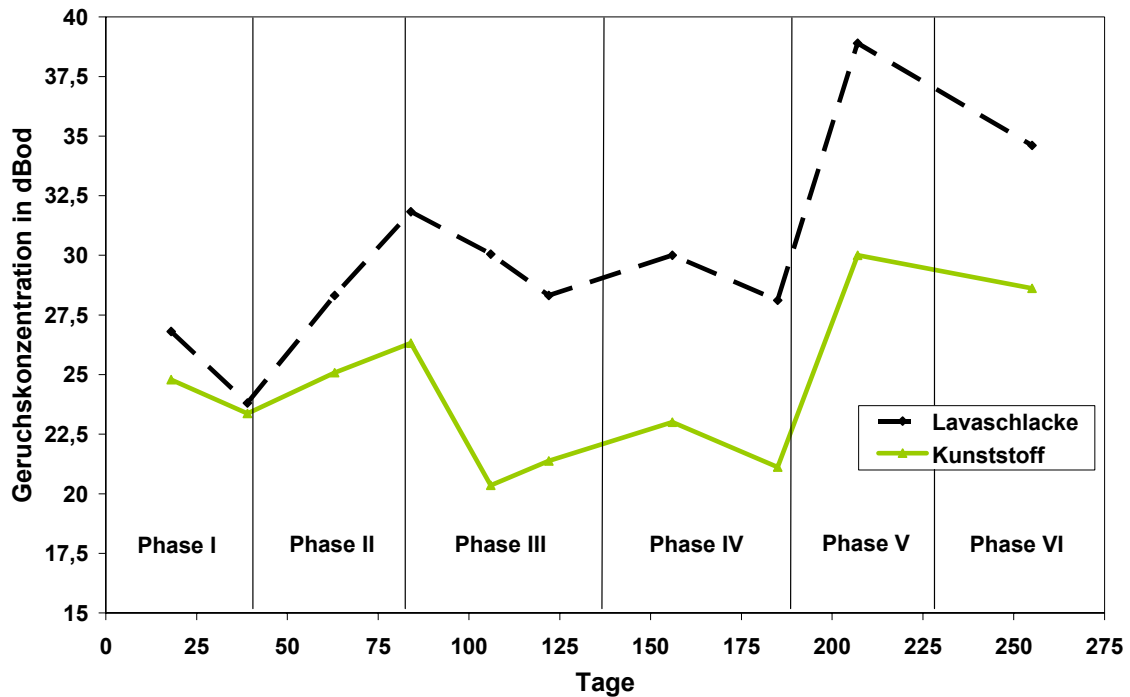


Abbildung 7.47: Ergebnisse der olfaktometrischen Untersuchungen für den halbertechnischen Tropfkörper im Laufe der Versuche

Das Kunststofffüllmaterial wies eine deutliche geringere Geruchsemission im Vergleich zur Lavaschlacke auf. Im Laufe der Versuche zeigte insbesondere die Lavaschlacke zunehmende Emissionswerte auf. Diese können auf die Erhöhung der organischen Belastung im Laufe der Versuche sowie den Anstieg der Biofilmdicke im Tropfkörper (siehe Abschnitt 7.5.1) zurückgeführt werden.

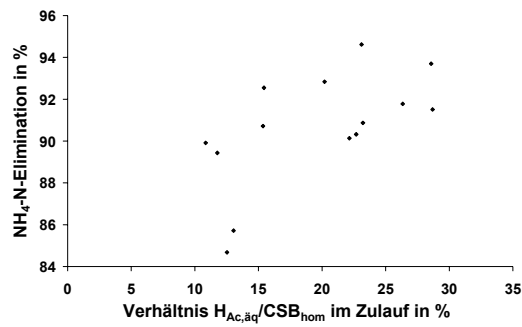
Darüber hinaus machen die Ergebnisse deutlich, dass die Dynamiken beider Linien miteinander im Zusammenhang stehen. Dies deutet darauf hin, dass momentane Faktoren der Umgebung des Tropfkörpers die Geruchsemission beeinflussen können.

8 Versuchsergebnisse mit versäuertem Abwasser

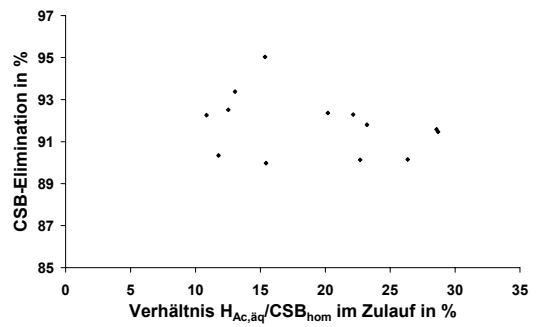
Eine Versäuerung des Abwassers könnte theoretisch im Kanalnetz aufgrund hoher Temperaturen und lange Fließstrecken entstehen. Es ist daher nachvollziehbar, dass das anfallende Abwasser von Kläranlagen in Ländern mit hohen Temperaturen und großen Kanalnetzen eine höhere Menge an organischen Säuren und höhere CSB-Werte aufweisen kann. Da organische Säuren hauptsächlich aus leicht abbaubaren Substanzen bestehen haben sie eine wichtige Bedeutung bei den Denitrifikationsvorgängen (Kapp, 1992). Andererseits könnte eine starke Versäuerung den pH-Wert insbesondere von weichen Abwässern (kleine Pufferung) reduzieren und die Erhöhung der organischen Belastung der flüssigen Phase bewirken.

Während der Versuchsabschnitte mit hohen Temperaturen lagen die Verhältnisse von $H_{Ac,äq} / CSB_{hom}$ im Zulauf des Tropfkörpers im Mittel bei ca. 9 %. Um zu ermitteln, ob höhere Mengen an organischen Säuren im Zulauf die Verschlechterung der Reinigungsleistung bewirkt, wurde durch Dosierung von Essigsäure das Verhältnis $H_{Ac,äq} / CSB_{hom}$ erhöht. Da keine repräsentativen Werte für organische Säure in der Literatur zu finden war, wurde das Verhältnis $H_{Ac,äq} / CSB_{hom}$ zwischen 10 und 30 % allmählich erhöht.

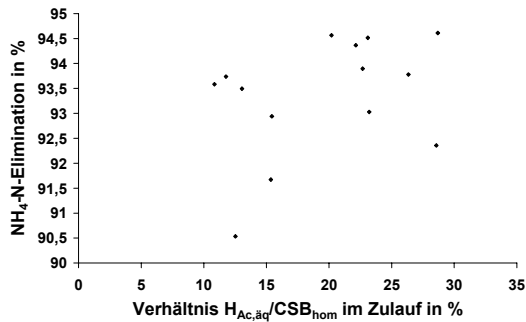
Die $H_{Ac,äq}$ -Konzentrationen im Zulauf (ohne Berücksichtigung des Rückführwassers) variierten hierbei zwischen 34 und 101 mg/l. Eine unabsichtliche geringfügige Verminderung der Raumbelastung wurde im selben Zeitraum festgestellt. In Abbildung 8.1 sind die NH_4 -N- und die CSB-Eliminationen sowie die Raumbelastung beider Füllmaterialien in Abhängigkeit vom $H_{Ac,äq} / CSB_{hom}$ – Verhältnis dargestellt. Die für die Berechnungen der Verhältnisse $H_{Ac,äq} / CSB_{hom}$ verwendeten CSB_{hom} -Konzentrationen beinhalten bereits den in der Essigsäure enthaltenen CSB.



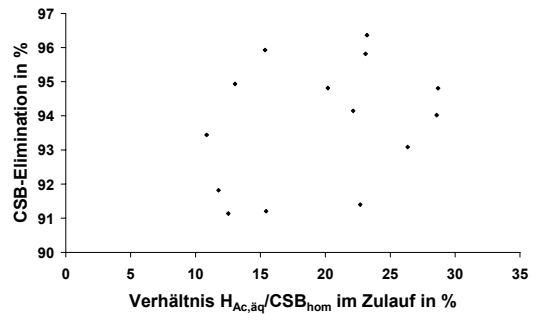
NH₄-N-Elimination (Lavaschlacke)



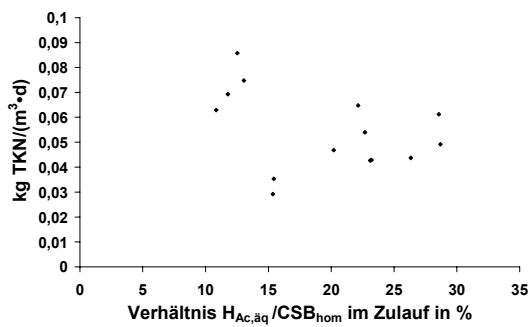
CSB-Elimination (Lavaschlacke)



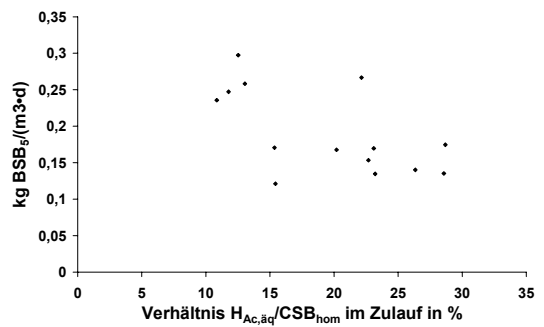
NH₄-N-Elimination (Kunststoff)



CSB-Elimination (Kunststoff)



TKN-Raumbelastung



BSB₅-Raumbelastung

Abbildung 8.1: NH₄-N- bzw. CSB-Elimination und Raumbelastung in Abhängigkeit vom Verhältnis $H_{Ac,äq} / CSB_{hom}$ im Zulauf für den halbttechnischen Tropfkörper

Mit zunehmender Essigsäuremenge im Zulauf sind keine Einbußen der NH₄-N- bzw. CSB-Eliminationen bei beiden Füllmaterialien zu beobachten. Die geringfügigen Zunahmen der NH₄-N-Eliminationen sind auf die Verminderungen der TKN-Raumbelastung zurückzuführen. Die CSB-Elimination blieb im untersuchten Zeitraum etwa konstant. Die $H_{Ac,äq}$ -Konzentrationen im Ablauf schwankten zwischen 6 und 12 mg/l für beide Füllmaterialien. Die pH-Werte streuten zwischen 7,2 und 7,4, die Säurekapazität ($SK_{4,3}$) zwischen 1,8 und 3,1. Die Ergebnisse deuten also darauf hin, dass die Essigsäure schnell abgebaut wurde.

Um zu überprüfen, ob die Denitrifikation durch die Erhöhung des Anteils an leicht abbaubaren Stoffen verbessert wurde, wurde in Abbildung 8.2 die N_{ges} -Elimination für beide Füllmaterialien gegen das Verhältnis $H_{\text{Ac},\text{äq}} / \text{CSB}_{\text{hom}}$ aufgetragen.

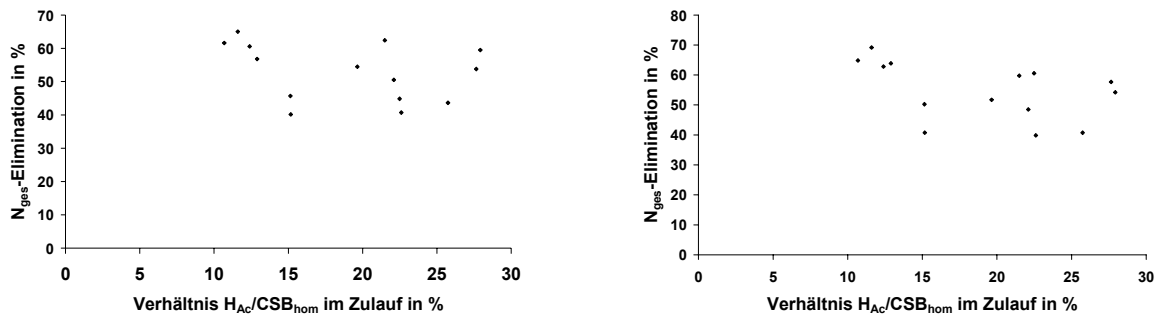


Abbildung 8.2: N_{ges} -Elimination in Abhängigkeit vom Verhältnis $H_{\text{Ac},\text{äq}} / \text{CSB}_{\text{hom}}$ im Zulauf für den halbtechnischen Tropfkörper

Es ist aus der Abbildung 8.2 eine tendenzielle Reduzierung der N_{ges} -Elimination mit zunehmender Essigsäuremenge zu erkennen, was auf die Erhöhung der NH_4 -Elimination (Abbildung 8.1) bei einer gleichzeitig annähernd konstanten Denitrifikationsrate zurückzuführen ist. Eine Erhöhung des leicht abbaubaren Kohlenstoffanteils führt nicht zu einer Steigerung der Denitrifikation, was zeigt, dass andere Faktoren prozesslimitierend sind.

9 Zusammenfassung

Vor dem Hintergrund, dass die bisherigen Bemessungsansätze nicht ohne weiteres auf tropische Gebiete übertragen werden können, wurde ein halbtechnischer Tropfkörper in der Versuchshalle der Universität Stuttgart unter hohen Luft- und Abwassertemperaturen in einer Klimakammer betrieben und untersucht. Zwei Füllmaterialien wurden separat untersucht: Lavaschlacke und Kunststofffüllmaterial. Die Abwassertemperatur wurde auf 25 °C, die Lufttemperatur wurde auf 30 °C eingestellt. Die Raumbelastung wurde allmählich in Schritten von ca. 0,2 kg BSB₅/(m³·d) gesteigert (im Mittel zwischen 0,15 und 0,98 kg BSB₅/(m³·d)).

Dabei zeigte der Kunststoff-Tropfkörper im Laufe der Versuche sowohl bei der Kohlenstoffelimination als auch der Nitrifikation eine bessere Reinigungsleistung als die Lavaschlacke auf. Die bessere Kohlenstoffelimination des Kunststoff-Tropfkörpers gegenüber dem Lavaschlacke-Tropfkörper kann nicht nur auf dessen höheren spezifischen Oberflächen zurückgeführt werden. Andere Füllmaterialeigenschaften wie der Hohlraumanteil spielen dabei auch eine wichtige Rolle. Bezüglich der NH₄-N-Elimination ist die spezifische Oberfläche bedeutsam. Die NH₄-N-Elimination beider Füllmaterialien ist bezogen auf die organische Flächenbelastung ähnlich. Längere Tropfzeiten tragen zusätzlich zur Erhöhung der NH₄-N-Elimination insbesondere beim Kunststoff-Tropfkörper bei.

Im kleinen Raumbelastungsbereich (ca. < 0,3 kg BSB₅/(m³·d)) war keine Verbesserung bezüglich der Kohlenstoffelimination bzw. der Nitrifikation bei 25 °C Abwassertemperatur gegenüber Literaturdaten von Tropfkörperanlagen in gemäßigten Klimaten zu erkennen. Mit zunehmender Raumbelastung waren eindeutige Leistungssteigerungen zu beobachten. Die relative Leistungssteigerung nahm mit zunehmender Raumbelastung zu.

Im Vergleich mit der im Arbeitsblatt 281 (ATV-DVWK, 2001) vorgegebenen zulässigen Raumbelastung für Tropfkörper ohne Nitrifikation (0,4 kg BSB₅/(m³·d) für die Lavaschlacke bzw. 0,6 kg BSB₅/(m³·d) für das Kunststofffüllmaterial) können bei einer Abwassertemperatur von 25 °C deutlich höhere Raumbelastungen eingestellt werden. Nach den dargestellten Versuchsergebnissen erfolgt die Kohlenstoffelimination in einem Lavaschlacke-Tropfkörper bei 1,0 kg BSB₅/(m³·d) noch weitestgehend, was eine Volumensparung von 60 % gegenüber den geltenden temperaturunabhängigen Bemessungswerten bewirkt. Bei Tropfkörpern mit Kunststofffüllmaterial sind höhere Raumbelastungen möglich. Bei einer Raumbelastung bis zu 1,2 kg BSB₅/(m³·d) erfolgt die Kohlenstoffelimination noch weitestgehend. Bei den jeweiligen Raumbelastungen findet für beide Füllmaterialien weiterhin eine Teilnitrifikation statt (über 30 % bezüglich der NH₄-Elimination).

Bei dem Ziel einer weitgehenden Nitrifikation (wie sie in Deutschland üblicherweise gefordert wird) ist beim Betrieb des Tropfkörpers bei 25 °C Abwassertemperatur im Vergleich zu Tropfkörperanlagen mit gemäßigten Temperaturen keine deutliche Leistungsverbesserung erkennbar. Bei 25 °C Abwassertemperatur ist eine Erhöhung der Raumbelastung unter Beibehaltung der vollständigen Nitrifikation demnach für das

untersuchte Abwasser (BSB_5/TKN – Verhältnis = ca. 4) nicht möglich. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass zur vollständigen Nitrifikation auch bei höheren Temperaturen das Tropfkörpervolumen entsprechend dem Arbeitsblatt 281 (ATV-DVWK, 2001) ermittelt werden kann, sich also keine Volumensparnis realisieren lässt.

In Entwicklungs- bzw. Schwellenländern gelten oftmals schwächere Überwachungsanforderungen als in Deutschland. In diesen Fällen könnten noch höhere Raumbelastungen für eine Teilnitrifikation eingestellt werden. Bei einer Raumbelastung bis zu $0,075 \text{ kg TKN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ (= ca. $0,3 \text{ kg BSB}_5/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$) für die Lavaschlacke bzw. $0,15 \text{ kg TKN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ (= ca. $0,6 \text{ kg BSB}_5/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$) für das Kunststofffüllmaterial wurden beispielsweise bei 25 °C Abwassertemperatur $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentrationen unter 10 mg/l im Ablauf im Mittel erreicht. Dabei ist jedoch zu beachten, dass aufgrund des Durchschlagens von Belastungsspitzen kurzzeitig höhere Ablaufwerte auftreten können und der Schwankungsbereich höher ist.

Mit zunehmender Raumbelastung nahm die Biofilmdicke zu. Die Verschlammung des Tropfkörpers konnte bei hohen Raumbelastungen nicht vermieden werden. Dennoch können hohe Raumbelastungen durch Anpassung der Spülkraft ermöglicht werden, die das starke Biomassenwachstum durch eine starke Abtragung der Biomasse kompensieren können. Die Anpassung und Optimierung der Spülkräfte waren jedoch nicht Gegenstand dieser Untersuchungen.

Da die Wirkung der Nachklärbecken im Laufe der Versuche unterschiedlich war und die abfiltrierbaren Stoffe im Ablauf teilweise sehr hohe Werte erreichten, wurde die Überschussschlammproduktion aus der Summe der abfiltrierbaren Stoffe im Ablauf und dem Überschussschlamm berechnet. Die so berechnete Überschussschlammproduktion betrug für beide Füllmaterialien während der gesamten Versuchslaufzeit denselben Wert: $0,62 \text{ g ÜS} / \text{g BSB}_{5,\text{elim}}$ bzw. $0,38 \text{ g ÜS} / \text{g CSB}_{\text{elim}}$. Da die Überschussschlammproduktion mit zunehmender Raumbelastung auch zunimmt, ist es empfehlenswert die Bemessung der Nachklärung in Bezug auf die Schlammvolumenbeschickung vorzunehmen.

Mit zunehmender Raumbelastung nahm der Glühverlust zu. Bei ca. $0,15 \text{ kg BSB}_5/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ lag der Glühverlust zwischen ca. 55 und 70 %, bei ca. $0,98 \text{ kg BSB}_5/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ lag der Glühverlust zwischen ca. 65 und 80 %.

Beide Füllmaterialien zeigten vergleichbare Tropfzeiten und Dispersionszahlen; es konnte kein wesentlicher Unterschied der Strömungsverhältnisse nachgewiesen werden. Die Erhöhung der Tropfzeit mit dem Anwachen des Biofilms kann positiv auf die Reinigungsleistung des Tropfkörpers auswirken. Stabilere CSB -, $\text{NH}_4\text{-N}$ - und N_{ges} -Eliminationen konnten insbesondere beim Kunststoff-Tropfkörper in den Phasen mit hohen Tropfzeiten erreicht werden.

Es wurden lineare Korrelationen der Luftströmung mit der Temperaturdifferenz zwischen Luft und Wasser gefunden. Sie stimmen aber nur bedingt mit der von Halvorson et al. (1936) gefundenen Korrelation überein. Die Neigungen der hier gefundenen Korrelationen nahmen mit zunehmender Raumbelastung bei beiden Füllmaterialien tendenziell ab. Dies wurde auf die Erhöhung des Widerstandes der Biofilmdicke mit zunehmender

Raumbelastung zurückgeführt. Der Umkehrpunkt, bei dem die Luftrichtung im Tropfkörper wechselt, schwankt aleatorisch zwischen einer Temperaturdifferenz (Luft – Wasser) von -2 und 1 °C. Nach den Ergebnissen von Halvorson et al. (1936) liegt der Umkehrpunkt bei einer Temperaturdifferenz von 2 °C.

Der Kunststoff-Tropfkörper wurde tendenziell besser belüftet als die Lavaschlacke-Tropfkörper, was auf den höheren Hohlraumanteil dieses Füllmaterialies zurückgeführt werden kann.

Die simultane Denitrifikation erwies sich als schwer kontrollierbar. Hohe Rezirkulationsraten tragen zur Verminderung der Denitrifikation durch die Erhöhung von gelöstem Sauerstoff bei. Dickere Biofilme assoziiert mit hohen Tropfzeiten scheinen wichtig für die Stabilität der Stickstoffelimination zu sein. Das Kunststofffüllmaterial erwies sich gegenüber beiden Parametern empfindlicher als die Lavaschlacke. Der Kunststoff-Tropfkörper zeigte für den ganzen untersuchten Raumbelastungsbereich eine höhere Stickstoffelimination als der Lavaschlacke-Tropfkörper auf. Eine maximale N_{ges} -Elimination von ca. 55 % für die Lavaschlacke bzw. von ca. 80 % für das Kunststofffüllmaterial wurde für Raumbelastungen kleiner als 0,5 kg BSB_g/(m³·d) erreicht.

Der halbtechnische Tropfkörper wurde von einem starken Befall von Tropfkörperfliegen (*Psychoda* sp.) betroffen. Sowohl die Kohlenstoffelimination als auch die Nitrifikation von beiden Füllmaterialien wurden beeinträchtigt. Die Fliegen vermehrten sich auf dem Kunststofffüllmaterial schneller als auf der Lavaschlacke.

Mit zunehmender organischer Belastung und zunehmender Biofilmdicke konnte eine tendenzielle Erhöhung der Geruchsentwicklung festgestellt werden. Der Kunststoff-Tropfkörper zeigte für den ganzen untersuchten Raumbelastungsbereich eine geringe Geruchsbelästigung als der Lavaschlacke-Tropfkörper.

Zur Nachbildung von möglichen Versäuerungsvorgängen im Kanalnetz als Folge von hohen Temperaturen und langen Fließstrecken wurde während eines Versuchsabschnittes Essigsäure im Zulauf zudosiert. Das $H_{Ac,äq} / CSB_{nom}$ – Verhältnis im Zulauf variierte dabei zwischen ca. 10 und 30 %. Es wurde kein Einfluss auf die Reinigungsleistung festgestellt. Eine Steigerung der Denitrifikation infolge der Erhöhung von schnellen abbaubaren Stoffen wurde ebenfalls nicht festgestellt. Hierbei sind andere Faktoren prozesslimitierend.

Der erfolgreiche Betrieb und die Untersuchung des halbtechnischen Tropfkörpers leisten einen wichtigen Beitrag zum Verständnis des Tropfkörperverfahrens unter hohen Temperaturen.

Die Entscheidung zwischen Lavaschlacke oder Kunststofffüllmaterial sollte unter Einbezug finanzieller und räumlicher Aspekte getroffen werden. Das Kunststofffüllmaterial ermöglicht den Aufbau von Tropfkörpern mit kleineren Volumina und stellt weniger konstruktive Anforderungen (Statik, Gewicht) im Vergleich zur Lavaschlacke, kann aber pro Volumeneinheit finanziell ungünstiger sein. Lavaschlacke bzw. ähnliche brockengefüllte Füllmaterialien sind natürliche Stoffe und können daher eventuell leichter

verfügbar sein, haben aber je nach der Anforderung an die Ablaufqualität einen großen Flächenbedarf.

Obwohl die Ergebnisse der hier vorgestellten Untersuchungen deutlich machten, dass hoch belastete Tropfkörperanlagen auch eine weitgehende Kohlenstoffelimination erreichen können, kann dies jedoch nicht ohne eine hohe Überschussschlammproduktion erreicht werden. Im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen war es nicht möglich, die Verschlämmung des Tropfkörpers bei hohen Raumbelastungen zu vermeiden. Ein langfristiger Betrieb des Tropfkörpers unter hohen Raumbelastungen und nicht ausreichenden Spülkräften führt unausweichlich zur Verstopfung und Beeinträchtigung der Reinigungsleistung.

Aus diesem Grund besteht Untersuchungsbedarf bezüglich der Optimierung des Schlammaustrages bei hohen organischen Belastungen. Über die Spülkraft hinaus müssen beispielsweise Einflüsse von Parametern wie der Tropfkörpergeometrie auf den Schlammaustrag untersucht werden. Der Schlamm der oberen Schicht könnte bei flachen Tropfkörpern theoretisch schneller ausgespült werden. Außerdem ist es prinzipiell möglich, mit flachen Tropfkörpern aufgrund der größeren verfügbaren Querschnittsfläche eine bessere Belüftung zu erreichen. Ein Kompromiss zwischen Volumen und Höhe müsste jedoch angesichts der Flächenbeschickung unter Einbeziehung der Rezirkulation gefunden werden.

10 Literaturverzeichnis

- ATV (1989)** Arbeitsblatt A 135: Grundsätze für die Bemessung von Tropfkörpern und Tauchkörpern mit Anschlusswerten über 500 Einwohnergleichwerte, 1989
- ATV (1997)** ATV-Handbuch Biologische und weitergehende Abwasserreinigung, 4. Auflage, Ernst & Sohn, Berlin, 1997
- ATV-DVWK (2001)** Arbeitsblatt A 281, Bemessung von Tropfkörpern und Rotationstauchkörpern, 2001
- Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (1999)** Das Mikroskopische Bild bei der biologischen Abwasserreinigung, 3. Auflage, Informationsbericht Heft 1, München, 1999
- Boller, M. (1986a)
Gujer, W.** Nitrification in Tertiary Trickling Filters Based on Theoretical Concepts, Water Research 20 (11), 1986, 1353 – 1361
- Boller, M. (1986b)
Gujer, W.** Nitrification in Tertiary Trickling Filters Followed by Deep-Bed Filters, Water Research 20 (11), 1986, 1363 – 1373
- Bruns, J. (1999)
Krauth, K.** Verweilzeitverteilung in Tropfkörpern in Abhängigkeit von der Füllstruktur und der Betriebsweise, Korrespondenz Abwasser 46 (4), 1999, 569 – 575
- BS EN (2002)** BS EN 12255-7, Wastewater Treatment Plants – Part 7: Biological Fixed-Film Reactors, 2002
- Cornel, P. (2005)
Kirchhof, W.
Menzel, U.
Orth, H.
Pinnekamp, J.
Rudolph, K.-U.
Schneider, T.
Wagner, M.** Anforderungen an die Abwassertechnik in anderen Ländern, Abschlussbericht zum BMBF-Vorhaben „Exportorientierte F & E Teil II - Abwasserbehandlung und Wasserwiederverwendung“, Ruhr-Universität Bochum, 2005

- Daigger, G.T. (1994)**
Heinemann, T.A.
Land, G.
Watson, R.S. Practical Experience with Combined Carbon Oxidation Nitrification in Plastic Media Trickling Filters, Water Science Technology 29 (10 – 11), 1994, 189 – 196
- DIN EN (2003)** Bestimmung der Geruchsstoffkonzentration mit dynamischer Olfaktometrie, 2003
- Dorias, B. (1996)** Stickstoffelimination mit Tropfkörpern, Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft 138, Stuttgart, 1996
- Eberl, H. (2006)**
Morgenroth, E.
Noguera, D.
Piciooreanu, C.
Rittmann, B.
Loosdrecht, M.v.
Wanner, O. Mathematical Modeling of Biofilms, IWA Task Group on Biofilm Modeling, IWA Publishing, London / Seattle, 2006
- Eckenfelder, Jr., W.W. (1963)**
Barnhart, E.L. Performance of a High Rate Trickling Filter Using Selected Media, Journal WPCF 35 (12), 1963, 1535 – 1551
- Gromiec, M.J. (1972)**
Malina, Jr., J.F.
Eckendelfer, Jr., W.W. Performance of Plastic Medium in Trickling Filters, Water Research Pergamon Press 6, 1972, 1321 – 1332
- Harrison, J. (1987)**
Daigger, G. A Comparison of Trickling Filter Media Journal WPCF 59 (7), 1987, 679 – 685
- Horn, H. (2004)**
Staudt, C.
Neu, T.
Leon-Ohl, A.
Bößmann, M.
Hempel, D.C. Untersuchungsmethoden für Biofilmsysteme, Chemie Ingenieur Technik 76 (3), 2004, 333 – 337
- Gebert, W. (2001)** Einflussfaktoren auf die Leitungsfähigkeit kunststoffgefüllter Tropfkörper, Berichte aus Wassergüte- und Abfallwirtschaft 159, TU München

- Halvorson, H.O. (1936)**
Savage, G.M.
Piret, E.L. Some Fundamental Factors Concerned in the Operation of Trickling Filters, Sewage Works Journal 8 (6), 1936, 888 – 903
- Honda, Y. (1981)**
Matsumoto, J. The Effect of Temperature on the Growth of Microbial Film in a Model Trickling Filter, Water Research 17 (4), 1981, 375 – 382
- Imhoff, K.R. (1979)** Betriebsergebnisse von Tropfkörperanlagen und Bemessungsvorschlag im Hinblick auf §7a WHG, GWF – Wasser/Abwasser 120 (2), 1979
- Kapp, H. (1984)** Denitrifikation in Kläranlagen – Forderung in Regionen mit geringer Carbonathärte des Trinkwassers, Wasserwirtschaft 74 (6), 1984, 319 – 326
- Kapp, H. (1992)** Online-Messung der organischen Säuren, Korrespondenz Abwasser 39 (7), 1992, 999 – 1004
- Kuenen, J.G. (1986)**
Jørgensen, B.B.
Revsbech, N.P. Oxygen Microprofiles of Trickling Filters Biofilms, Water Research 20 (12), 1986, 1589 – 1598
- Kühl, M. (1992)**
Jørgensen, B.B. Microsensor Measurements of Sulfate Reduction and Sulfide Oxidation in Compact Microbial Communities of Aerobic Biofilms, Applied and Environmental Microbiology 58, 1992, 1164 – 1174
- Logan, B.E. (1987a)**
Hermanowicz, S.W.
Parker, D.S. A Fundamental Model for Trickling Filter Process Design, Journal WPCF 59.(12), 1987, 1029 – 1041
- Logan, B.E. (1987b)**
Hermanowicz, S.W.
Parker, D.S. Engineering Implications of a New Trickling Filter Model, Journal WPCF 59 (12), 1987, 1017 – 1028
- Maurer, M. (2006)** Persönliche Mitteilungen
- Maisch, H. (1994)**
Schwentner, G. Umrüstung einer Tropfkörperanlage zur Stickstoffelimination am Beispiel des Klärwerkes Sindelfingen, Korrespondenz Abwasser 41 (9), 1994, 1564 – 1578

- Metcalf und Eddy (2003)** Wastewater Engineering, Treatment and Reuse, 4. Auflage, McGraw-Hill, New York, 2003
- Mudrack K. (1984)
Kunst, S.** Biologie der Abwasserreinigung, 4. Auflage, Fischer, Stuttgart, 1994
- Müller, X. (1985)
Sekoulov, I.** Über Tracermessungen zur Bestimmung der Verweilzeit-Verteilungsfunktion am Tropfkörper und am Festbettreaktor, Wasserwirtschaft 75 (11), 489 – 492
- Norris, D.P. (1982)
Parker, D.S.
Daniels, M.L.
Owens, E.L.** High-quality Trickling Filter Effluent without Tertiary Treatment, Journal WPCF 59 (7), 1982, 1082 – 1098
- Oliveira, S.M.A.C. (2006)
Souki, M.I.O.
Sperling, M.v.** Wastewater characteristics in a developing country based on a large survey (166 treatment plants), IWA 5th World Water Congress, Beijing, 2006
- Onuma, M. (1985)
Omura, T.
Umita, T.
Aizawa, J.** Diffusion Coefficient and Its Dependency on Some Biochemical Factors, Biotechnology and Bioengineering 27, 1985, 1533 – 1539
- Parker, D.S. (1999)** Trickling Filter Mythology, Journal of Environmental Engineering, 1999, 618 – 625
- Parker, D.S. (1984)
Merrill, D.T.** Effect of Plastic Media Configuration on Trickling Filter Performance, Journal WPCF 56 (12), 1984, 955 – 961
- Parker, D.S. (1998)
Romano, L.S.
Horneck, H.S.** Making a Trickling Filter/Solids Contact Process Work for Cold Weather Nitrification and Phosphorus Removal, Water Environment Research 70 (2), 1998, 181 – 188
- Parker, D.S. (1986)
Richards, T.** Nitrification in Trickling Filters, Journal WPCF 58, 1986, 896 – 902

- Pönninger, R. (1965)** Biologische Abwasserreinigung durch Tropfkörper. Verlag der "Österreichischen Abwasserrundschau", Wien, 1965
- Quirk, T.P. (1972)** Scale-Up and Process Design Techniques for Fixed Film Biological Reactors, Water Research 6, 1972, 1333 – 1360
- Reiff, H. (1992)** Wachstum und Abtrag der Sichelhaut in Mischwasserkanälen, Schriftenreihe des Fachgebiets Siedlungswasserwirtschaft, Universität – Gesamthochschule Kassel, 1992
- Richards, T. (1986)** Evaluation of Plastic Media in Trickling Filters, Journal WPCF 58 (7), 1986, 774 – 783
Reinhart, D.
- Rincke, G. (1967)** Neuere Gesichtspunkte zur Abwasserreinigung mit Tropfkörpern, GWF – Wasser/Abwasser 108 (24), 1967, 667 – 673
- Rittmann, B.E. (2001)** Environmental Biotechnology: Principles and Applications, McGraw-Hill, New York, 2001
McCarty, P.L.
- Rüdiger, A. (1993)** Untersuchungen zur Denitrifikation von Tropfkörpern, Hamburger Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft 11, TU Hamburg-Harburg, 1993
- Särner, E. (1980)** Plastic-Packed Trickle Filters, Ann Arbor Science, Michigan, 1980
- Schwentner, G. (2005)** 32. Leistungsvergleich der kommunalen Kläranlagen in Baden-Württemberg, DWA Landesverband Baden-Württemberg, 2005
Hildebrand, H.
Fischer, A.
- Sigloch, H. (2005)** Technische Fluidmechanik, 5. Auflage, Springer, Berlin und Heidelberg, 2005
- Solbé, J.F.d.L.G. (1974)** The Effects of Temperature on the Performance of Experimental Percolating Filters with and without Mixed Macro-Invertebrate Populations, Water Research 8, 1974, 557 – 573
Ripley, P.G.
Tomlinson, T.G.

- Sperling, M.v. (2005)**
Chernicharo, C.A.d.L. Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions, Volume 2, IWA Publishing, London / Seattle, 2005
- Imhoff, K. (1990)**
Imhoff, K.R. Taschenbuch der Stadtentwässerung, 27. Auflage, R. Oldenburg Verlag, München / Wien, 1990
- Twachtmann, U. (2000)** Autotrophe Stickstoffelimination in Tropfkörpern; Stuttgarter Berichte für Siedlungswasserwirtschaft 158, Stuttgart, 2000
- U.S. EPA (2000a)** U.S. EPA 832-F-00-014, Trickling Filters, Wastewater Technology Fact Sheet, Washington D.C., 2000
- U.S. EPA (2000b)** U.S. EPA 832-F-00-015, Trickling Filter Nitrification, Wastewater Technology Fact Sheet, Washington D.C., 2000
- Vaughan, G.M. (1984)**
Holder, G.A. Substrate removal in the trickling filter process, Journal WPCF 56 (5), 1984, 417 – 423
- Velz, C.J. (1948)** A Basic Law for the Performance of Biological Filters, Sewage Works Journal 20 (4), 1948, 607 – 617
- Wäsche, S. (2002)**
Horn, H.
Hempel, D.C. Influence of Growth Conditions on Biofilm Development and Mass Transfer at the Bulk Interface, Water Research 35, 2002, 4775 – 4784
- Wilderer, P. (1982)**
Nahrgang, Th. Biotechnische Grundlagen der Nitrifikation im Tropfkörper, Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft 77, 57. Siedlungswasserwirtschaftliches Kolloquium, 1982
- Wolf, P. (1984)** Betriebserfahrungen an Tropfkörpern, GWF – Wasser/Abwasser 125 (4), 1983, 186 – 193
- Wolf, P. (1987)** Weitgehende Stickstoffoxidation in Tropfkörpern, 1987, 645 – 649
- Wolf, P. (1991)** Denitrifikation bei Festbettreaktoren, Korrespondenz Abwasser 38, 1991, 937 – 939

Wolf, P. (1992)

Mehlhart, G.

Ergebnisse aus halbtechnischen Versuchen zur
Denitrifikation bei Tropfkörperanlagen, AWT
Abwassertechnik (4), 1992, 14 – 16

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|----------------|---|----|
| Abbildung 3.1: | Schematische Darstellung des Schichtenaufbaus und der Abbauvorgängen im Biofilm (nach ATV, 1997) | 3 |
| Abbildung 3.2: | BSB ₅ -Elimination in Abhängigkeit von der BSB ₅ -Raumbelastung für brockengefüllte Tropfkörper des Ruhrverbandes (Rincke, 1967 und Imhoff, 1979) | 6 |
| Abbildung 3.3: | CSB-Elimination in Abhängigkeit von der BSB ₅ -Raumbelastung für brockengefüllte Tropfkörper des Ruhrverbandes (Imhoff, 1979) | 6 |
| Abbildung 3.4: | Nitratanteil im Ablauf (NO ₃ -N / (NO ₃ -N + NH ₄ -N)) in Abhängigkeit von der BSB ₅ -Raumbelastung für brockengefüllte Tropfkörper mit Abwassertemperaturen von mindestens 10 °C (Wolf, 1984) | 7 |
| Abbildung 3.5: | N _{ges} -Elimination in Abhängigkeit von der BSB ₅ -Raumbelastung für brockengefüllte Tropfkörper (Rincke, 1967) | 8 |
| Abbildung 3.6: | Luftströmung in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zwischen Luft und Wasser für einen halbtechnischen brockengefüllten Tropfkörper (Halvorson et al., 1936) | 14 |
| Abbildung 4.1: | NH ₄ -N-Elimination in Abhängigkeit des BSB ₅ /TKN-Verhältnisses (nach Okey und Albertson in Metcalf und Eddy, 2003) | 22 |
| Abbildung 4.2: | Schematische Darstellung der Abbauvorgänge im vertikalen Profil des Tropfkörpers gemäß dem Modelansatz von Wolf (1987) | 23 |
| Abbildung 5.1: | Klimakammer und halbtechnischen Tropfkörper in der Versuchshalle der Universität Stuttgart | 25 |
| Abbildung 5.2: | Sieblinie der verwendeten Lavaschlacke | 26 |
| Abbildung 5.3: | Schema der halbtechnischen Tropfkörperanlage | 27 |
| Abbildung 5.4: | Beprobungseinrichtungen im vertikalen Profil des Tropfkörpers | 28 |
| Abbildung 5.5: | Herausnehmbare Füllproben für die Lavaschlacke bzw. das Kunststofffüllmaterial | 28 |
| Abbildung 5.6: | Dirac-Impuls und Antwortsignal (nach Eckenfelder und Barnhart, 1963) | 34 |
| Abbildung 6.1: | Abbau im vertikalen Profil des halbtechnischen Tropfkörpers mit gemäßigten Luft- und Abwassertemperaturen (die angegebenen Raumbelastungen beziehen sich auf die durchschnittlichen erreichten Werte in den jeweiligen Phasen („Mittel“) bzw. die während der Messung laufenden BSB ₅ -Raumbelastungen („momentan“)) | 41 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|-----------------|--|----|
| Abbildung 7.1: | BSB ₅ -Zulaufkonzentrationen und BSB ₅ /TKN-Verhältnisse im Laufe der Versuche | 44 |
| Abbildung 7.2: | AFS-Konzentrationen im Ablauf des halbtechnischen Tropfkörpers im Laufe der Versuche | 45 |
| Abbildung 7.3: | BSB ₅ -Elimination für den halbtechnischen Tropfkörper in Abhängigkeit von der BSB ₅ -Raumbelastung (Ablaufwerte auf 20 mg/l AFS normiert) | 46 |
| Abbildung 7.4: | BSB ₅ im Zu- und Ablauf des halbtechnischen Tropfkörpers in Abhängigkeit von der BSB ₅ -Raumbelastung (Ablaufwerte auf 20 mg/l AFS normiert) | 47 |
| Abbildung 7.5: | CSB-Elimination für den halbtechnischen Tropfkörper in Abhängigkeit von der BSB ₅ -Raumbelastung | 48 |
| Abbildung 7.6: | CSB im Zulauf und CSB _{mf} im Ablauf des halbtechnischen Tropfkörpers in Abhängigkeit von der BSB ₅ -Raumbelastung | 49 |
| Abbildung 7.7: | NH ₄ -N-Elimination für den halbtechnischen Tropfkörper in Abhängigkeit von der TKN-Raumbelastung und dem BSB ₅ /TKN-Verhältnis | 50 |
| Abbildung 7.8: | TKN-Konzentration im Zulauf und NH ₄ -N-Konzentration im Ablauf des halbtechnischen Tropfkörpers in Abhängigkeit von der TKN-Raumbelastung | 51 |
| Abbildung 7.9: | BSB ₅ -Elimination für den halbtechnischen Tropfkörper in Abhängigkeit von der BSB ₅ -Flächenbelastung | 52 |
| Abbildung 7.10: | NH ₄ -N-Elimination für den halbtechnischen Tropfkörper in Abhängigkeit von der TKN-Flächenbelastung | 53 |
| Abbildung 7.11: | N _{ges} -Elimination für den halbtechnischen Tropfkörper in Abhängigkeit von der TKN-Raumbelastung | 54 |
| Abbildung 7.12: | P _{ges} -Elimination für den halbtechnischen Tropfkörper in Abhängigkeit von der BSB ₅ -Raumbelastung | 55 |
| Abbildung 7.13: | P _{ges} -Konzentration im Zulauf und PO ₄ -P-Konzentration im Ablauf des halbtechnischen Tropfkörpers in Abhängigkeit von der BSB ₅ -Raumbelastung | 56 |
| Abbildung 7.14: | BSB ₅ -Elimination in Abhängigkeit von der BSB ₅ -Raumbelastung des halbtechnischen Tropfkörpers mit Lavaschlacke bei einer Abwassertemperatur von 25 °C (BSB ₅ -Ablaufwerte normiert auf max. 20 mg SS/l) und von brockengefüllten Tropfkörpern des Ruhrverbandes mit gemäßigten Abwassertemperaturen (zusätzliche Absetzzeit der Ablaufproben von 2 h im Labor; Imhoff, 1979) | 57 |

- Abbildung 7.15: CSB-Elimination in Abhängigkeit von der BSB₅-Raumbelastung des halbtechnischen Tropfkörpers mit Lavaschlacke bei einer Abwassertemperatur von 25 °C (membranfiltrierte Ablaufwerte) und von brockengefüllten Tropfkörpern des Ruhrverbandes mit gemäßigten Abwassertemperaturen (zusätzliche Absetzzeit der Ablaufproben von 2 h im Labor; Imhoff, 1979) 58
- Abbildung 7.16: N_{ges}-Elimination in Abhängigkeit von der BSB₅-Raumbelastung des halbtechnischen Tropfkörpers mit Lavaschlacke bei einer Abwassertemperatur von 25 °C und von brockengefüllten Tropfkörpern des Ruhrverbandes mit gemäßigten Abwassertemperaturen (Rincke, 1967) 59
- Abbildung 7.17: Theoretische und gemessene Nitratanteile (NO_x-N / (NO_x-N + NH₄-N) im Ablauf des halbtechnischen Tropfkörpers mit Lavaschlacke bei einer Abwassertemperatur von 25 °C und von brockengefüllten Tropfkörpern mit gemäßigten Abwassertemperaturen (Wolf, 1984) 60
- Abbildung 7.18: BSB_{5,elim}-Vertrauensbereich für den halbtechnischen Tropfkörper mit Lavaschlacke bei einer Abwassertemperatur von 25 °C und für brockengefüllte Tropfkörper mit gemäßigten Abwassertemperaturen (Imhoff, 1979) in Abhängigkeit von der Raumbelastung; NH₄-N_{elim}-Vertrauensbereich für den halbtechnischen Tropfkörper mit Lavaschlacke bei einer Abwassertemperatur von 25 °C und NH₄-N_{elim}-Regression für brockengefüllte Tropfkörper mit gemäßigten Abwassertemperaturen (Wolf, 1984) in Abhängigkeit von der Raumbelastung 61
- Abbildung 7.19: CSB_{5,elim}-Vertrauensbereich für den halbtechnischen Tropfkörper mit Lavaschlacke bei einer Abwassertemperatur von 25 °C und für brockengefüllte Tropfkörper mit gemäßigten Abwassertemperaturen (Imhoff, 1979) in Abhängigkeit von der Raumbelastung; NH₄-N_{elim}-Vertrauensbereich für den halbtechnischen Tropfkörper mit Lavaschlacke bei einer Abwassertemperatur von 25 °C und NH₄-N_{elim}-Regression für brockengefüllte Tropfkörper mit gemäßigten Abwassertemperaturen (Wolf, 1984) in Abhängigkeit von der Raumbelastung; 62
- Abbildung 7.20: Repräsentative Abbauvorgänge im vertikalen Profil des halbtechnischen Tropfkörpers mit Lavaschlacke bei einer Abwassertemperatur von 25 °C für die Phasen I bis IV (die angegebenen Raumbelastungen beziehen sich auf die durchschnittlichen erreichten Werte in den jeweiligen Phasen („Mittel“) bzw. die während der Messung laufenden BSB₅-Raumbelastungen („momentan“) 64

| | |
|--|----|
| Abbildung 7.21: Repräsentative Abbauvorgänge im vertikalen Profil des halbtechnischen Tropfkörpers mit Lavaschlacke bei einer Abwassertemperatur von 25 °C bei hohen Raumbelastungen für die Phasen IV und V (die angegebenen Raumbelastungen beziehen sich auf die durchschnittlichen erreichten Werte in den jeweiligen Phasen („Mittel“) bzw. die während der Messung laufenden BSB ₅ -Raumbelastungen („momentan“) | 65 |
| Abbildung 7.22: Repräsentative Abbauvorgänge im vertikalen Profil des halbtechnischen Tropfkörpers mit Kunststofffüllmaterial bei einer Abwassertemperatur von 25 °C bei hohen Raumbelastungen für die Phasen I bis VI (die angegebenen Raumbelastungen beziehen sich auf die durchschnittlichen erreichten Werte in den jeweiligen Phase („Mittel“) bzw. die während der Messung laufenden BSB ₅ -Raumbelastungen („momentan“) | 66 |
| Abbildung 7.23: Einfluss der BSB ₅ -Raumbelastung auf die Umsatzraten in der oberen Schicht des halbtechnischen Tropfkörpers bei einer Abwassertemperatur von 25 °C mit Lavaschlacke | 67 |
| Abbildung 7.24: Einfluss der BSB ₅ -Raumbelastung auf die Umsatzraten in der oberen Schicht des halbtechnischen Tropfkörpers bei einer Abwassertemperatur von 25 °C mit Kunststoff | 68 |
| Abbildung 7.25: Verlauf der BSB ₅ -Raumbelastung im Zulauf und des CSB _{mf} im Ablauf für den halbtechnischen Tropfkörper bei einer Abwassertemperatur von 25 °C vom 01.05.07 bis 03.05.07 | 69 |
| Abbildung 7.26: Verlauf der BSB ₅ -Raumbelastung im Zulauf und des CSB _{mf} im Ablauf für den halbtechnischen Tropfkörper bei einer Abwassertemperatur von 25 °C vom 01.05.07 bis 03.05.07 | 70 |
| Abbildung 7.27: Verlauf der BSB ₅ -Raumbelastung im Zulauf und des CSB _{mf} im Ablauf für den halbtechnischen Tropfkörper bei einer Abwassertemperatur von 25 °C vom 13.05.07 bis 15.05.07 | 71 |
| Abbildung 7.28: Verlauf des TKN im Zulauf und des NH ₄ -N im Ablauf für den halbtechnischen Tropfkörper bei einer Abwassertemperatur von 25 °C vom 13.05.07 bis 15.05.07 | 72 |
| Abbildung 7.29: Abtropfgewicht des Biofilms für Füllmaterialproben auf ca. 1 m Höhe über dem Gitterboden des halbtechnischen Tropfkörpers im Laufe der Versuche | 73 |
| Abbildung 7.30: Spezifische Überschlammproduktion im Zusammenhang mit der Spülkraft für den halbtechnischen Tropfkörper im Laufe der Versuche | 74 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 7.31: Spezifische Überschlammproduktion im Zusammenhang mit der Spülkraft für den halbtechnischen Tropfkörper im Laufe der Versuche | 75 |
| Abbildung 7.32: Glühverlust des Überschussschlammes vom halbtechnischen Tropfkörper im Laufe der Versuche | 76 |
| Abbildung 7.33: Biofilm in der Füllmaterialprobe (1 m über dem Gitterrost) des halb-technischen Tropfkörpers mit Kunststofffüllmaterial bei ca. 0,98 kg BSB ₅ /(m ³ ·d) am 16.11.2006 | 77 |
| Abbildung 7.34: Kunststofffüllmaterial im mittleren Tropfkörperbereich (ca. 0,75 m über dem Gitterboden) des halbtechnischen Tropfkörpers bei ca. 0,98 kg BSB ₅ /(m ³ ·d) am 16.11.2006 | 78 |
| Abbildung 7.35: Kunststofffüllmaterial im mittleren Tropfkörperbereich (ca. 0,75 m über dem Gitterboden) des halbtechnischen Tropfkörpers bei ca. 0,21 kg BSB ₅ /(m ³ ·d) am 04.06.2007 | 78 |
| Abbildung 7.36: Biofilm im oberen Bereich des halbtechnischen Tropfkörpers mit Kunststofffüllmaterial bei ca. 0,98 kg BSB ₅ /(m ³ ·d) am 16.11.2006 | 79 |
| Abbildung 7.37: Biofilm im oberen Bereich des halbtechnischen Tropfkörpers mit Kunststofffüllmaterial bei ca. 0,21 kg BSB ₅ /(m ³ ·d) am 04.06.2007 | 79 |
| Abbildung 7.38: Biofilmdicke für verschiedene Messstellen im oberen Bereich des halbtechnischen Tropfkörpers mit Kunststofffüllmaterial bei ca. 0,98 kg BSB ₅ /(m ³ ·d) | 80 |
| Abbildung 7.39: Tropfzeiten für verschiedene Flächenbeschickungen am Beispiel des halbtechnischen Tropfkörpers mit Lavaschlacke in der Phase III | 82 |
| Abbildung 7.40: Tropfzeit in Abhängigkeit von der Flächenbeschickung für den halbtechnischen Tropfkörper mit Lavaschlacke im Laufe der Versuche | 83 |
| Abbildung 7.41: Tropfzeit in Abhängigkeit von der Flächenbeschickung für den halbtechnischen Tropfkörper mit Kunststoff im Laufe der Versuche | 85 |
| Abbildung 7.42: Tropfzeit und Flächenbeschickung für den halbtechnischen Tropfkörper im Laufe der Versuche | 87 |
| Abbildung 7.43: Luftströmung in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zwischen Luft und Wasser für den halbtechnischen Tropfkörper in der Phase IV | 88 |
| Abbildung 7.44: Luftströmung in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zwischen Luft und Wasser für den halbtechnischen Tropfkörper mit Lavaschlacke | 89 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|-----------------|---|----|
| Abbildung 7.45: | Luftströmung in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zwischen Luft und Wasser für den halbtechnischen Tropfkörper mit Kunststofffüllmaterial | 89 |
| Abbildung 7.46: | Spezifische Luftströmung im Laufe der Versuche für den halbtechnischen Tropfkörper | 90 |
| Abbildung 7.47: | Ergebnisse der olfaktometrischen Untersuchungen für den halbtechnischen Tropfkörper im Laufe der Versuche | 92 |
| Abbildung 8.1: | NH ₄ -N- bzw. CSB-Elimination und Raumbelastung in Abhängigkeit vom Verhältnis $H_{Ac,äq} / CSB_{hom}$ im Zulauf für den halbtechnischen Tropfkörper | 94 |
| Abbildung 8.2: | N _{ges} -Elimination in Abhängigkeit vom Verhältnis $H_{Ac,äq} / CSB_{hom}$ im Zulauf für den halbtechnischen Tropfkörper | 95 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|--------------|---|----|
| Tabelle 3.1: | Empfohlene Spülkräfte in Abhängigkeit von der BSB ₅ -Raumbelastung nach WEF (Metcalf und Eddy, 2003) | 10 |
| Tabelle 4.1: | Maximale zulässige Raumbelastungen nach ATV-DVWK (2001) für die Auslegung von einstufigen Tropfkörpern mit und ohne Nitrifikation | 16 |
| Tabelle 4.2: | Typische Belastungswerte für die Auslegung von brockengefüllten Tropfkörpern in Abhängigkeit vom Reinigungsziel („National Annex NA“ im BS EN, 2002) | 19 |
| Tabelle 4.3: | Typische Raumbelastungen von brockengefüllten Tropfkörpern ohne Nitrifikation (U.S. EPA, 2000a) | 20 |
| Tabelle 4.4: | Typische Raumbelastungen von Tropfkörpern mit Nitrifikation (U.S. EPA, 2000b) | 20 |
| Tabelle 4.5: | Empfohlene Werte für k_B , zul. B_A und V_N nach Wolf (1987) in Abhängigkeit von der Temperatur (V_N berechnet für 5 mg NH ₄ -N/l im Ablauf) | 24 |
| Tabelle 5.1: | Füllmaterialeigenschaften des halbtechnischen Tropfkörpers | 26 |
| Tabelle 5.2: | Zulässige Raumbelastungen nach verschiedenen Bemessungsansätzen für den halbtechnischen Tropfkörper mit Nitrifikation unter gemäßigten Temperaturen | 29 |
| Tabelle 5.3: | Zulässige Raumbelastungen nach verschiedenen Bemessungsansätzen für den halbtechnischen Tropfkörper ohne Nitrifikation unter gemäßigten Temperaturen | 30 |
| Tabelle 5.4: | Angestrebte BSB ₅ -Raumbelastungen in jeder Ref. Phase | 31 |
| Tabelle 6.1: | Betriebseinstellungen im Mittelwert für den halbtechnischen Tropfkörper in der Referenzphase | 37 |
| Tabelle 6.2: | Raumbelastungen und Ablaufmittelwerte des halbtechnischen Tropfkörpers und des LFKW für die Ref. Phasen I und II | 38 |
| Tabelle 6.3: | Raumbelastungen und Ablaufmittelwerte des halbtechnischen Tropfkörpers für die Ref. Phasen III und IV | 39 |
| Tabelle 7.1: | Betriebseinstellungen im Mittelwert für den halbtechnischen Tropfkörper pro Phase | 43 |
| Tabelle 7.2: | Koeffizienten der Gleichung $\zeta = K \cdot h_{TK} / (q_A^n)$ für die Berechnung der Tropfzeit des halbtechnischen Tropfkörpers mit Lavaschlacke in den verschiedenen Phasen | 83 |

| | | |
|--------------|---|----|
| Tabelle 7.3: | Dispersionszahlen D/ul in Abhängigkeit der Flächenbeschickung für den halbtechnischen Tropfkörper mit Lavaschlacke im Laufe der Versuche | 84 |
| Tabelle 7.4: | Koeffizienten der Gleichung $\zeta = K \cdot h_{TK} / (q_A^n)$ für die Berechnung der Tropfzeit des halbtechnischen Tropfkörpers mit Kunststoff in den verschiedenen Phasen | 85 |
| Tabelle 7.5: | Dispersionszahlen D/ul in Abhängigkeit der Flächenbeschickung für den halbtechnischen Tropfkörper mit Kunststofffüllmaterial im Laufe der Versuche | 86 |

Anhang I: Ermittlung der zulässigen Raumbelastungen für den halbtechnischen Tropfkörper nach verschiedenen Bemessungsansätzen

Grunddaten des halbtechnischen Tropfkörpers:

$$V_{TK} = 18,4 \text{ m}^3$$

$$V_{TK,KS} = V_{TK,LA} = V_{TK} / 2 = 9,2 \text{ m}^3$$

$$A_{TK} = 4,72 \text{ m}^2$$

$$A_{TK,KS} = A_{TK,LA} = A_{TK} / 2 = 2,36 \text{ m}^2$$

$$h_{TK} = h_{TK,KS} = h_{TK,LA} = 3,9 \text{ m}$$

Konzentrationsermittlung der Ablauf Vorklä rung des LFKW von Oktober 2002 bis zu September 2005:

$$C_{85\%,BSB} = 218 \text{ mg/l}$$

$$C_{85\%,TKN} = 52 \text{ mg/l}$$

$$C_{85\%,BSB} / C_{85\%,TKN} = 4,2$$

Angenommene Anforderung an die Ablaufqualität:

$$C_{BSB,AB} = 20 \text{ mg/l}$$

$$BSB_5\text{-Elimination} = \frac{C_{BSB,ZU} - C_{BSB,AB}}{C_{BSB,ZU}} \cdot 100 = \frac{218 - 20}{218} \cdot 100 = 91\%$$

$$C_{NH_4-N,Ab} = 7 \text{ mg/l}$$

$$NH_4\text{-N-Elimination} = \frac{TKN_{ZU} - NH_4 - N_{AB} - N_{org}}{TKN_{ZU}} \cdot 100 = \frac{52 - 7 - 2}{52} \cdot 100 = 83\%$$

Nachrechnung nach ATV-DVWK-A 281 (2001):

- Tropfkörper mit Kohlenstoffabbau und Nitrifikation für die Lavaschlacke:

$$V_{TK} = 9,2 = \frac{B_{d,BSB}}{B_{R,BSB,zul.}} + \frac{B_{d,TKN}}{B_{R,TKN,zul.}} = \frac{Q_{ZU} \cdot 0,218}{0,4} + \frac{Q_{ZU} \cdot 0,052}{0,1}$$

$$\Rightarrow Q_{ZU} = 8,6 \text{ m}^3 / \text{d}$$

$$B_{R,BSB} = \frac{Q_{ZU} \cdot C_{BSB}}{V_{TK}} = \frac{8,6 \cdot 0,218}{9,2} = 0,2 \text{ kg BSB}_5 / (\text{m}^3 \cdot \text{d})$$

$$B_{R,TKN} = \frac{B_{R,BSB}}{C_{85\%,BSB} / C_{85\%,TKN}} = \frac{0,2}{4,2} = 0,048 \text{ kg TKN} / (\text{m}^3 \cdot \text{d})$$

- Tropfkörper mit Kohlenstoffabbau und Nitrifikation für das Kunststofffüllmaterial:

$$V_{TK} = 9,2 = \frac{B_{d,BSB}}{B_{R,BSB,zul.}} + \frac{B_{d,TKN}}{B_{R,TKN,zul.}} = \frac{Q_{ZU} \cdot 0,218}{0,6} + \frac{Q_{ZU} \cdot 0,052}{0,15}$$

$$\Rightarrow Q_{ZU} = 13 \text{ m}^3 / \text{d}$$

$$B_{R,BSB} = \frac{Q_{ZU} \cdot C_{BSB}}{V_{TK}} = \frac{13 \cdot 0,218}{9,2} = 0,31 \text{ kg BSB}_5 / (\text{m}^3 \cdot \text{d})$$

$$B_{R,TKN} = \frac{B_{R,BSB}}{C_{85\%,BSB} / C_{85\%,TKN}} = \frac{0,31}{4,2} = 0,074 \text{ kg TKN} / (\text{m}^3 \cdot \text{d})$$

- Tropfkörper mit Kohlenstoffabbau ohne Nitrifikation für die Lavaschlacke:

$$B_{R,BSB} = B_{R,BSB,zul.} = 0,40 \text{ kg BSB}_5 / (\text{m}^3 \cdot \text{d})$$

- Tropfkörper mit Kohlenstoffabbau ohne Nitrifikation für das Kunststofffüllmaterial:

$$B_{R,BSB} = B_{R,BSB,zul.} = 0,60 \text{ kg BSB}_5 / (\text{m}^3 \cdot \text{d})$$

Nachrechnung nach BS EN 122557 (2002):

- Tropfkörper mit Kohlenstoffabbau und Nitrifikation für die Lavaschlacke:

$$B_{R,NH_4-N} = B_{R,NH_4-N,zul.} = 0,05 \text{ kg NH}_4 - \text{N} / (\text{m}^3 \cdot \text{d})$$

- Tropfkörper mit Kohlenstoffabbau ohne Nitrifikation für die Lavaschlacke:

$$B_{R,BSB} = B_{R,BSB,zul.} = 0,50 \text{ kg BSB}_5 / (\text{m}^3 \cdot \text{d})$$

Nachrechnung nach U.S. EPA 832-F-00-015 (2000):

- Tropfkörper mit Kohlenstoffabbau und Nitrifikation für die Lavaschlacke:

$$B_{R,BSB} = B_{R,BSB,zul.} = 0,16 \text{ kg BSB}_5 / (\text{m}^3 \cdot \text{d})$$

$$B_{R,TKN} = \frac{B_{R,BSB}}{C_{85\%,BSB} / C_{85\%,TKN}} = \frac{0,16}{4,2} = 0,038 \text{ kg TKN} / (\text{m}^3 \cdot \text{d})$$

- Tropfkörper mit Kohlenstoffabbau und Nitrifikation für das Kunststofffüllmaterial:

$$B_{R,BSB} = B_{R,BSB,zul.} = 0,29 \text{ kg BSB}_5 / (\text{m}^3 \cdot \text{d})$$

$$B_{R,TKN} = \frac{B_{R,BSB}}{C_{85\%,BSB} / C_{85\%,TKN}} = \frac{0,29}{4,2} = 0,069 \text{ kg TKN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$$

- Tropfkörper mit Kohlenstoffabbau ohne Nitrifikation für die Lavaschlacke:

$$B_{R,BSB} = B_{R,BSB,zul.} = 0,4 \text{ kg BSB}_5 /(\text{m}^3 \cdot \text{d})$$

Nachrechnung nach dem Modellansatz von Okey und Albertson (Metcalf und Eddy, 2003):

$$R_N = 0,82 \cdot \left(\frac{C_{BSB}}{C_{TKN}} \right)^{-0,44} = 0,82 \cdot 4,2^{-0,44} = 0,44 \text{ g NH}_4 - \text{N}_{elim} /(\text{m}^2 \cdot \text{d})$$

- Tropfkörper mit Kohlenstoffabbau und Nitrifikation für die Lavaschlacke:

$$B_{R,TKN} = \frac{R_N \cdot A_R}{1000} = \frac{0,44 \cdot 90}{1000} = 0,040 \text{ kg TKN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$$

$$B_{R,BSB} = B_{R,TKN} \cdot \frac{C_{85\%,BSB}}{C_{85\%,TKN}} = 0,040 \cdot 4,2 = 0,17 \text{ kg BSB}_5 /(\text{m}^3 \cdot \text{d})$$

- Tropfkörper mit Kohlenstoffabbau und Nitrifikation für das Kunststofffüllmaterial:

$$B_{R,TKN} = \frac{R_N \cdot A_R}{1000} = \frac{0,44 \cdot 152}{1000} = 0,067 \text{ kg TKN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$$

$$B_{R,BSB} = B_{R,TKN} \cdot \frac{C_{85\%,BSB}}{C_{85\%,TKN}} = 0,067 \cdot 4,2 = 0,28 \text{ kg BSB}_5 /(\text{m}^3 \cdot \text{d})$$

Nachrechnung nach der NRC-Gleichung (Metcalf und Eddy, 2003):

- Tropfkörper mit Kohlenstoffabbau ohne Nitrifikation für die Lavaschlacke:

$$F = \frac{1 + RV}{\left(1 + \frac{RV}{10}\right)^2} = \frac{1 + 1}{\left(1 + \frac{1}{10}\right)^2} = 1,65$$

$$\text{BSB}_5\text{-Elimination} = 91 = \frac{100}{1 + 0,4432 \cdot \sqrt{\frac{B_{d,BSB}}{V_{TK} \cdot F}}} = \frac{100}{1 + 0,4432 \cdot \sqrt{\frac{B_{R,BSB}}{1,65}}}$$

$$\Rightarrow B_{R,BSB} = 0,08 \text{ kg BSB}_5 /(\text{m}^3 \cdot \text{d})$$

Nachrechnung nach der Velz-Gleichung (Parker und Merrill, 1984):

- Tropfkörper mit Kohlenstoffabbau ohne Nitrifikation für das Kunststofffüllmaterial bei 12 °C Abwassertemperatur:

$$C_{\text{BSB,AB}} = \frac{C_{\text{BSB,ZU}}}{(1+RV) \cdot \exp\left\{\frac{k_{20} \cdot A_R \cdot h \cdot 1,035^{(T-20)}}{[(Q_{\text{ZU}}/A_{\text{TK}}) \cdot (RV+1)]^n}\right\}} - RV$$

$$\Rightarrow 20 = \frac{218}{(1+1) \cdot \exp\left\{\frac{0,0019 \cdot 152 \cdot 3,9 \cdot 1,035^{(12-20)}}{[(Q_{\text{ZU}}/2,36) \cdot (1+1)]^{0,5}}\right\}} - 1$$

$$\Rightarrow Q_{\text{ZU}} = 0,27 \text{ l/s} = 23,5 \text{ m}^3 / \text{d}$$

$$B_{\text{R,BSB}} = \frac{Q_{\text{ZU}} \cdot C_{\text{BSB}}}{V_{\text{TK}}} = \frac{23,5 \cdot 0,218}{9,2} = 0,56 \text{ kg BSB}_5 / (\text{m}^3 \cdot \text{d})$$

- Tropfkörper mit Kohlenstoffabbau ohne Nitrifikation für das Kunststoffüllmaterial bei 25 °C Abwassertemperatur:

$$C_{\text{BSB,AB}} = \frac{C_{\text{BSB,ZU}}}{(1+RV) \cdot \exp\left\{\frac{k_{20} \cdot A_R \cdot h \cdot 1,035^{(T-20)}}{[(Q_{\text{ZU}}/A_{\text{TK}}) \cdot (RV+1)]^n}\right\}} - RV$$

$$\Rightarrow 20 = \frac{218}{(1+1) \cdot \exp\left\{\frac{0,0019 \cdot 152 \cdot 3,9 \cdot 1,035^{(25-20)}}{[(Q_{\text{ZU}}/2,36) \cdot (1+1)]^{0,5}}\right\}} - 1$$

$$\Rightarrow Q_{\text{ZU}} = 0,67 \text{ l/s} = 57,9 \text{ m}^3 / \text{d}$$

$$B_{\text{R,BSB}} = \frac{Q_{\text{ZU}} \cdot C_{\text{BSB}}}{V_{\text{TK}}} = \frac{57,9 \cdot 0,218}{9,2} = 1,37 \text{ kg BSB}_5 / (\text{m}^3 \cdot \text{d})$$

Nachrechnung nach dem Modellansatz von Wolf (1987):

- Tropfkörper mit Kohlenstoffabbau und Nitrifikation für die Lavaschlacke bei 12 °C Abwassertemperatur:

$$\text{erf. } h_{\text{ges}} = \frac{(\ln B_{\text{A,O}} - \ln(\text{zul. } B_{\text{A}})) \cdot 24 \cdot q_{\text{A}}}{k_{\text{B}} \cdot A_{\text{R}}} + \frac{\Delta N}{V_{\text{N}} \cdot A_{\text{R}} \cdot A_{\text{TK}}}$$

$$\Rightarrow 3,9 = \frac{(\ln(218/(1+1) \cdot 24 \cdot q_{\text{A}}/90) - \ln(6)) \cdot 24 \cdot q_{\text{A}}}{0,2 \cdot 90} + \frac{(52 - 7 - 2) \cdot q_{\text{A}} \cdot 24 \cdot 2,36}{0,6 \cdot 90 \cdot 2,36}$$

$$\Rightarrow q_{\text{A}} = 0,20 \text{ m/h}$$

$$Q_{\text{ZU}} = \frac{q_{\text{A}} \cdot A_{\text{TK}}}{(1+RV)} = \frac{0,20 \cdot 2,36}{(1+1)} = 0,24 \text{ m}^3 / \text{h} = 5,7 \text{ m}^3 / \text{d}$$

$$B_{\text{R,BSB}} = \frac{Q_{\text{ZU}} \cdot C_{\text{BSB}}}{V_{\text{TK}}} = \frac{5,7 \cdot 0,218}{9,2} = 0,14 \text{ kg BSB}_5 / (\text{m}^3 \cdot \text{d})$$

$$B_{R,TKN} = \frac{B_{R,BSB}}{C_{85\%,BSB} / C_{85\%,TKN}} = \frac{0,14}{4,2} = 0,033 \text{ kg TKN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$$

- Tropfkörper mit Kohlenstoffabbau und Nitrifikation für das Kunststofffüllmaterial bei 12 °C Abwassertemperatur:

$$\text{erf. } h_{\text{ges}} = \frac{(\ln B_{A,O} - \ln (\text{zul. } B_A)) \cdot 24 \cdot q_A}{k_B \cdot A_R} + \frac{\Delta N}{V_N \cdot A_R \cdot A_{TK}}$$

$$\Rightarrow 3,9 = \frac{(\ln (218/(1+1) \cdot 24 \cdot q_A / 152) - \ln (6)) \cdot 24 \cdot q_A}{0,2 \cdot 152} + \frac{(52 - 7 - 2) \cdot q_A \cdot 24 \cdot 2,36}{0,6 \cdot 152 \cdot 2,36}$$

$$\Rightarrow q_A = 0,34 \text{ m/h}$$

$$Q_{ZU} = \frac{q_A \cdot A_{TK}}{(1+RV)} = \frac{0,34 \cdot 2,36}{(1+1)} = 0,40 \text{ m}^3/\text{h} = 9,6 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$B_{R,BSB} = \frac{Q_{ZU} \cdot C_{BSB}}{V_{TK}} = \frac{9,6 \cdot 0,218}{9,2} = 0,23 \text{ kg BSB}_5/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$$

$$B_{R,TKN} = \frac{B_{R,BSB}}{C_{85\%,BSB} / C_{85\%,TKN}} = \frac{0,23}{4,2} = 0,055 \text{ kg TKN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$$

- Tropfkörper mit Kohlenstoffabbau und Nitrifikation für die Lavaschlacke bei 25 °C Abwassertemperatur:

$$\text{erf. } h_{\text{ges}} = \frac{(\ln B_{A,O} - \ln (\text{zul. } B_A)) \cdot 24 \cdot q_A}{k_B \cdot A_R} + \frac{\Delta N}{V_N \cdot A_R \cdot A_{TK}}$$

$$\Rightarrow 3,9 = \frac{(\ln (218/(1+1) \cdot 24 \cdot q_A / 90) - \ln (18)) \cdot 24 \cdot q_A}{0,5 \cdot 90} + \frac{(52 - 7 - 2) \cdot q_A \cdot 24 \cdot 2,36}{2,4 \cdot 90 \cdot 2,36}$$

$$\Rightarrow q_A = 0,79 \text{ m/h}$$

$$Q_{ZU} = \frac{q_A \cdot A_{TK}}{(1+RV)} = \frac{0,79 \cdot 2,36}{(1+1)} = 0,93 \text{ m}^3/\text{h} = 22,4 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$B_{R,BSB} = \frac{Q_{ZU} \cdot C_{BSB}}{V_{TK}} = \frac{22,4 \cdot 0,218}{9,2} = 0,53 \text{ kg BSB}_5/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$$

$$B_{R,TKN} = \frac{B_{R,BSB}}{C_{85\%,BSB} / C_{85\%,TKN}} = \frac{0,53}{4,2} = 0,126 \text{ kg TKN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$$

- Tropfkörper mit Kohlenstoffabbau und Nitrifikation für das Kunststofffüllmaterial bei 25 °C Abwassertemperatur:

$$\text{erf. } h_{\text{ges}} = \frac{(\ln B_{A,O} - \ln (\text{zul. } B_A)) \cdot 24 \cdot q_A}{k_B \cdot A_R} + \frac{\Delta N}{V_N \cdot A_R \cdot A_{TK}}$$

$$\Rightarrow 3,9 = \frac{(\ln(218/(1+1)) \cdot 24 \cdot q_A / 152) - \ln(18)) \cdot 24 \cdot q_A}{0,5 \cdot 152} + \frac{(52 - 7 - 2) \cdot q_A \cdot 24 \cdot 2,36}{2,4 \cdot 152 \cdot 2,36}$$
$$\Rightarrow q_A = 1,34 \text{ m/h}$$

$$Q_{ZU} = \frac{q_A \cdot A_{TK}}{(1+RV)} = \frac{1,34 \cdot 2,36}{(1+1)} = 1,58 \text{ m/h} = 37,9 \text{ m}^3 / \text{d}$$

$$B_{R,BSB} = \frac{Q_{ZU} \cdot C_{BSB}}{V_{TK}} = \frac{37,9 \cdot 0,218}{9,2} = 0,90 \text{ kg BSB}_5 / (\text{m}^3 \cdot \text{d})$$

$$B_{R,TKN} = \frac{B_{R,BSB}}{C_{85\%,BSB} / C_{85\%,TKN}} = \frac{0,90}{4,2} = 0,214 \text{ kg TKN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$$

Anhang II: Messung der Biofilmdicke

Die Messung der Dicke erfolgt analog zum von Reiff (1992) entwickelten Verfahren (Abbildung II.1).

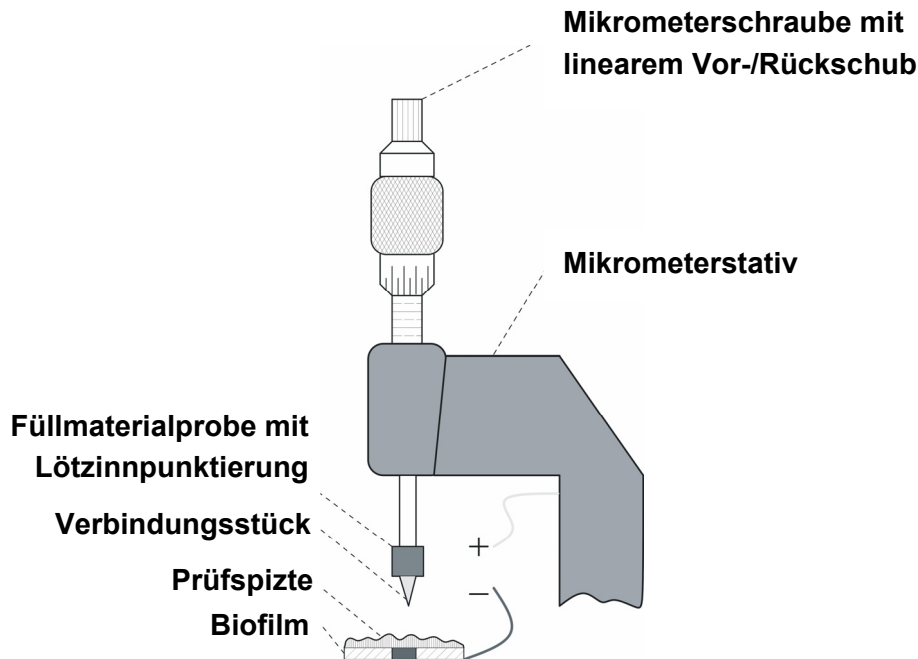


Abbildung II.1: Messeinrichtung zur Bestimmung der Biofilmdicke bei Füllmaterialproben des halbtechnischen Tropfkörpers mit Kunststofffüllmaterial

Zur Durchführung dieser Messung müssen kleine Stücke von Kunststofffüllmaterialproben mit Lötinn punktirt werden, so dass sie am Lötinn leitfähig sind. Ein Spannungsgeber und ein Amperemeter werden zwischen dem Lötinn und der Mikroschraube angeschlossen. Nach dem Abtropfen der Probe wird der Mikrometer langsam an die Biofilmoberfläche herangeführt. Bei Berührung bekommt das Amperemeter ein Impulssignal und der am Mikrometer angegebene Abstand wird abgelesen. Nachfolgend wird der Mikrometer bis zur Füllmaterialoberfläche mit dem Lötinn herangefahren bis ein zweites Impulssignal am Amperemeter beobachtet wird. Der neue Abstand am Mikrometer wird abgelesen. Aus der Differenz beider Ablesungen ergibt sich die Biofilmdicke.

Die gewonnenen Werte sind jedoch nicht für den gesamten Tropfkörper repräsentativ, sondern nur für den Bereich, in dem die Füllmaterialproben platziert wurden. Aufgrund der Inhomogenität der Biofilmoberfläche können die Messungen eine starke Variation voneinander aufweisen, daher müssen sie statistisch gesichert werden.

Anhang III: Analysenverfahren

Die Analysen wurden gemäß den folgenden Normen durchgeführt:

Tabelle III.1: Analysenverfahren

| | | |
|--|---|-----------------------|
| Abfiltrierbare Stoffe | DIN 38409 Teil 9 | DEV H 9 |
| BSB_{5,ZU} | DIN 38409 Teil 52 (8.2) (Sapromat) | DEV H 52 (8.2) |
| BSB_{AB} | In Ahnlehnung an DIN 38409 Teil 51 | DEV H 51 |
| CSB | DIN 38409 Teil 41 – 2 | DEV H 41 – 2 |
| Glühverlust | DIN 38409 Teil 1/3 | DEV H 1/3 |
| H_{Ac,äq} bzw. organische Säure | Acidimetrische Titration (nach Kapp, 1983) | |
| NH₄-N | DIN 38406 Teil 5 | DEV E 5 – 2 |
| NO₂-N | DIN EN 26777 | DEV D 10 |
| NO₃-N | Dr. Lange Küvettentest LCK 339, 340 | |
| P_{ges} | DIN 38405 Teil 11 | DEV D 11 |
| PO₄-P | DIN EN 1189 | DEV D 11 |
| pH – Wert | DIN 38404 Teil 5 | DEV C 5 |
| SK_{4,3} | DIN 38409 Teil 7 1 – 2 | DEV H 7 1/2 |
| TKN | DIN EN 25663 | DEV H 11 |
| Trockensubstanz (mit Faltenfilter) | DIN 38409 Teil 2/2 | DEV H 2/2 |